

**EVALUACIÓN MORFODINÁMICA CON ESQUEMAS DE
PROTECCIÓN COSTERA EN LAS PLAYAS DE
RIOHACHA, LA GUAJIRA**

**POR
YEISON M. BERRIO ARRIETA**

**TESIS PRESENTADA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL**

**DIRIGIDA POR
GERMÁN RIVILLAS OSPINA PhD**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**BARRANQUILLA-ATLÁNTICO
MARZO DEL 2018**

FICHA TÉCNICA

Código Estudiante	200101213
Nombre	YEISON MIGUEL BERRIO ARRIETA
Email	yeisonb@uninorte.edu.co
Título de la tesis	Evaluación morfodinámica con esquemas de protección costera en las playas de Riohacha, La Guajira
Director de tesis	GERMAN DANIEL RIVILLAS OSPINA PhD
Grupo de investigación	Instituto de Desarrollo Sostenible (IDS)
Área de investigación	Ingeniería costera
Línea de investigación	Restauración de playas
Sub-línea de investigación	Evolución Cross-shore de playas

Firma director tesis
PhD. German Rivillas Ospina

Dedicado principalmente a Dios, creador de todo.
A mi madre, mujer de admirar por su incasable lucha
y a todos mis hermanos

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Programa de *Investigación, Desarrollo e Innovación para protección de zonas costeras en los departamentos de La Guajira y Magdalena* y la Universidad del Norte en el marco del Proyecto *Diseño de proyectos pilotos y guía metodológica para protección y recuperación de playas en los departamentos de La Guajira y Magdalena por su apoyo técnico y financiero.*

Muy especialmente a mi tutor y director de tesis el Dr. Germán Rivillas por su acertada orientación, soporte y discusión crítica, asimismo al Instituto de Desarrollo Sostenible (IDS) y el Grupo de Costas y Puertos de la Universidad del Norte en especial a la Ing. Marianella por su gran apoyo en esos momentos tan difíciles.

A mi familia por su apoyo y soportar que siga estudiando, les agradezco mucho su paciencia y prometo devolver todas esas preocupaciones y tristezas con momentos de felicidad, alegría, amor y mucho optimismo para seguir adelante.

Agradezco al Dr. Gabriel Ruiz y Dr. Rodrigo Alonso, por aceptar ser parte de mi jurado y por cada una de las observaciones y sugerencias en la revisión de mi tesis.

Al Laboratorio de Hidráulica por abrirme las puertas de tan noble grupo. A mi amigo Jesús, compañero de travesía. A los futuros Dr Lina y Guillermo por siempre compartir sus valiosos conocimientos e invaluable consejos y a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto describir y analizar mediante modelación matemática el comportamiento de la evolución morfológica de una playa con sistemas de estructuras de protección costeras y su efecto en los procesos de erosión que se presenta en la zona del caribe colombiano y demostrar que la implementación de estas estructuras reportadas en la literatura no ha funcionado para mitigar los procesos erosivos en el distrito de Riohacha, La Guajira. A pesar de la masificación del uso de soluciones de protección costera, en Colombia no existen investigaciones que permitan anticipar con precisión el comportamiento de la evolución de un perfil ante estructuras de protección costera durante eventos de oleaje extremo. Por tanto, mediante un modelo de bucle abierto como XBeach, es posible investigar para condiciones extremas la evolución morfológica de un perfil de playa con presencia de estructuras costeras. Luego de realizar un diseño de experimentos se obtienen resultados que indican que el modelo es capaz de predecir la evolución de un perfil de tormenta alcanzando un puntaje de habilidad de error medio cuadrático de 0,96. Por tanto, se aplicó el modelo en 2DH y se observó que para las condiciones extremas el comportamiento de las isobatas cerca de la dirección Este del espolón indican acumulación de sedimentos, mientras que en la región Oeste las isobatas revelan erosión. Lo anterior está muy correlacionado al patrón de corrientes en el área de estudio que mueve el sedimento en dirección Este-Sureste. En consiguiente las estructuras actuales en la zona de estudio no son recomendables porque interrumpen el transporte de sedimentos y agravan los procesos de erosión costera aumentando la tasa de erosión facilitando la exportación de arena costa afuera.

Palabras claves: playa de Riohacha, morfología de playas, transporte de sedimentos, modelación morfodinámica, estructuras costeras.

Abstract

The main goal of this research is to describe and analyze by numerical modeling the behavior of the morphological evolution of a beach as a result of coastal protection structures. Their effect on processes of coast erosion that occur in the Colombian Caribbean is also studied in order to demonstrate that the implementation of these structures have not mitigated erosion processes in the district of Riohacha, La Guajira. Despite the massive implementation of coastal protection schemes in Colombia, there has been no research that account for an accurate prediction of the beach profile evolution when coastal protection structures are present during extreme wave events. To address this, with an open loop model as the XBeach model, it is possible to investigate for extreme conditions the morphological evolution of a beach profile with the presence of coastal structures. After developing an experimental design, results are obtained that indicate that the model is capable of predicting the storm profile evolution, reaching a Mean-Squared Error Skill Score BSS of 0,96. Therefore, the 2DH model was applied and it was observed that for extreme conditions the behavior of isobaths near the eastern direction of groin indicate accumulation of sediments, while in the western region the isobaths reveal erosion. This is highly correlated to the surface currents pattern in the area of study that moves the sediment in the East-Southeast direction. Consequently, the current structures in the district of Riohacha are not recommendable because they interrupt the transport of sediments and aggravate coastal erosion processes, increasing the rate of erosion and facilitating the export of offshore sand.

Keywords: Riohacha beach, beach morphology, sediment transport, morphology simulation, coastal structures

ÍNDICE GENERAL

	Págs.
CAPÍTULO I	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo General.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.3 FORMULACIÓN DE PREGUNTAS E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	18
1.4 ANTECEDENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO	20
1.5 ESTADO DEL ARTE	21
CAPÍTULO II	34
2 MARCO TEÓRICO	35
2.1 MORFOLOGÍA DE PLAYAS	35
2.1.1 El perfil de playas	36
2.1.2 Variación del Perfil.....	37
2.1.3 Profundidad de cierre	41
2.1.4 Evolución del perfil de playa	42
2.1.5 Escalas espaciales	44
2.1.6 Perfil transversal de equilibrio.....	46
2.1.7 Transporte de sedimentos	48
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE UNA PLAYAS	49
2.2.1 Modelos de evolución en el corto plazo	50
2.2.2 Modelos de evolución en el largo plazo	53
2.3 DESCRIPCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO XBEACH	56
2.3.1 Sistema de coordenadas	57
2.3.2 Definición de la grilla.....	58
2.3.3 Opciones hidrodinámicas	59
2.3.4 Formulaciones y procesos del modelo	61

2.3.5	Criterios para selección del modelo XBeach	69
CAPÍTULO III		70
3	METODOLOGÍA	71
3.1	GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO	73
3.1.1	Fisiografía	75
3.1.2	Variables atmosféricas.	76
3.1.3	Características meteomarinas	78
3.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	80
3.2.1	Hidrodinámica.....	83
3.3	ANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO	85
3.4	MODELO DE REFERENCIA.....	91
3.4.1	Localización y batimetría	93
3.4.2	Características del sedimento.....	95
3.4.3	Dirección de la malla	96
3.4.4	Condiciones de frontera de oleaje	97
3.4.5	Condiciones de frontera de marea.....	97
3.4.6	Módulo de vegetación.....	98
3.5	ESTUDIO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	100
3.5.1	Modelación 2D.....	102
3.5.2	Modelación modo estacionario y surfbeat	102
3.6	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL MODELO	104
3.7	ESCENARIOS ACTUALES MODELADOS	106
3.8	SISTEMAS DE PROTECCIÓN PROPUESTOS MODELADOS.....	106
CAPÍTULO IV		111
4	RESULTADOS	112
4.1	CASOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	112
4.1.1	Efecto de la vegetación	125
4.2	ESCENARIOS CON ESTRUCTURAS ACTUALES MODELADOS	127
4.3	SISTEMAS DE PROTECCIÓN HIPOTÉTICOS MODELADOS	131
4.3.1	Ingeniería Blanda.....	131
4.3.2	Ingeniería Dura.....	136

5	CONCLUSIONES.....	142
6	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	143
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	144

Índice de figuras

	Págs.
Figura 2-1. Zonificación y elementos del perfil de playa. Adaptado de (Morang & Parson, 2008)	37
Figura 2-2. Estado de playa disipativa. Modelo de Wright y Short (1984).....	38
Figura 2-3. Estado de playa con barra longitudinal. Modelo de Wright y Short (1984)	39
Figura 2-4. Estado de playa y barras rítmicas. Modelo de Wright y Short (1984).	40
Figura 2-5. Estado de playa con barras transversales. Modelo de Wright y Short (1984).	40
Figura 2-6. Estado de playa con terraza de bajamar. Modelo de Wright y Short (1984)..	41
Figura 2-7. Playa reflejante. Modelo de Wright y Short (1984).....	41
Figura 2-8. Perfil de erosión y acreción de playas. Adaptado de (Van Rijn, 1998)	46
Figura 2-9. Clasificación de modelos de evolución de morfología de playas.	49
Figura 2-10. Estructura del modelo XBeach. Adaptado de Daly, (2009).....	57
Figura 2-11. Sistema de coordenadas rectangular de XBeach. Adaptado de (Roelvink et al., 2015).....	58
Figura 2-12. Definición de la grilla XBeach. Adaptado de Roelvink et al., (2015).....	59
Figura 3-1. Esquema general de la metodología empleada en la investigación.....	71
Figura 3-2. Ubicación Geográfica del sector de estudio	73
Figura 3-3. Ubicación geográfica de las estructuras de protección en las playas de estudio.....	74
Figura 3-4. Cobertura de la información de Reanálisis NARR	76
Figura 3-5. Variación del viento promedio mensual de La Guajira.	77
Figura 3-6. Ubicación de zona de interés y perfil de control	81
Figura 3-7. Procedimiento de toma de muestras de playa.	82
Figura 3-8. Distribución de las muestras de sedimentos a lo largo de la costa	82
Figura 3-9. Ubicación de la boya disponible en zona de estudio	84
Figura 3-10. Localización de punto virtual para el sector de estudio.	86
Figura 3-11. Curva de probabilidad de excedencia y probabilidad conjunta del punto virtual (11. 75° N, -72. 92° O)	86
Figura 3-12. Punto virtual 11.75 ° N, -72.92 ° O	87
Figura 3-13. Serie de tiempo de altura significativa de ola del punto virtual (11.75 ° N, -72.92 ° O)	88
Figura 3-14. Curva de régimen extremo para el punto virtual 11.75 ° N, -72.92 ° O	89
Figura 3-15. Análisis de clúster con 20 grupos punto virtual (11.75 ° N, -72.92 ° O)	89
Figura 3-16. Mallado utilizado en la validación y simulaciones con XBeach	94
Figura 3-17. Batimetría inicial zona de estudio.....	95
Figura 3-18. Curva granulométrica de la zona de interés. Riohacha- La Guajira.....	96
Figura 3-19. Perfil de control con vegetación.....	99
Figura 3-20. Perfil de playa con la barra sumergida artificial	107

Figura 3-21. Configuración de espolones lineales	107
Figura 3-22. Configuración de rompeolas I	108
Figura 3-23. Configuración de espolones con forma de T	108
Figura 3-24. Configuración de obras de abrigo	109
Figura 3-25. Inclínación de obras de abrigo	109
Figura 4-1. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio para la variación del parámetro s.	113
Figura 4-2. Espectro de energía para diferentes valores del coeficiente de propagación direccional.	115
Figura 4-3. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio del modelo estacionario ...	118
Figura 4-4. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio del modelo surfbeat	121
Figura 4-5. Sensibilidad del modelo surfbeat al parámetro lwave.....	124
Figura 4-6. Sensibilidad del modelo estacionario al parámetro lwave.....	124
Figura 4-7. Efecto de la vegetación en la zona de estudio.....	126
Figura 4-8. Evolución morfodinámica de la zona de estudio en modo surfbeat	128
Figura 4-9. Vectores de velocidad modelados con Xbeach	128
Figura 4-10. Evolución morfodinámica de la zona de estudio en modo estacionario	129
Figura 4-11. Evolución morfodinámica de la barra artificial a un h= 2.5m	132
Figura 4-12. Evolución morfodinámica de la barra artificial a una h= 3m	133
Figura 4-13. Evolución morfodinámica de la barra artificial a una h= 3.5m	134
Figura 4-14. Comparación de perfiles de playa con soluciones de ingeniería blanda	134
Figura 4-15. Comparación de procesos de erosión y acreción de ingeniería blanda.....	135
Figura 4-16. Evolución morfológica bajo condiciones de Hs=2 y Tp=8s, con espolones lineales.	137
Figura 4-17. Evolución morfológica bajo condiciones de Hs=2 y Tp=8s con rompeolas..	138
Figura 4-18. Evolución morfológica bajo condiciones de Hs=2 y Tp=8s con espolones en T.	139
Figura 4-19. Evolución morfológica bajo condiciones de Hs=2 y Tp=8s con obras de abrigo.	140
Figura 4-20. Evolución morfológica bajo condiciones de Hs=2 y Tp=8 con obras de abrigo inclinada.....	140
Figura 4-21. Comparación de procesos de erosión y acreción de soluciones duras	141

Índice de tablas

	Págs.
Tabla 2-1. Expresiones para estimar el factor de forma A	47
Tabla 3-1. Estado actual de las estructuras y procesos de transformación del oleaje	75
Tabla 3-2. Fechas de las mediciones de campo en las playas de Riohacha	80
Tabla 3-3. Valores de los centroides que representan los estados de mar definidos a través de análisis de clúster tipo k-means.	90
Tabla 3-4. Diferentes parámetros para modo estacionario y surfbeat.....	91
Tabla 3-5. Ajustes utilizados en los modelos de referencia en modo estacionario y surfbeat	92
Tabla 3-6. Valores de propagación direccional usados en una hora de simulación	92
Tabla 3-7. Parámetros necesarios cuando se utiliza la opción jons en XBeach..	97
Tabla 3-8. Parámetros necesarios cuando se utiliza la opción stat en XBeach ..	97
Tabla 3-9. Parámetros necesarios para modelación de la vegetación en XBeach	98
Tabla 3-10. Valores de importantes parámetros en la calibración de XBeach	100
Tabla 3-11. Combinación de parámetros para determinar la sensibilidad del XBeach.....	101
Tabla 3-12. Modelos ejecutados para determinar la sensibilidad de lwave.....	102
Tabla 3-13. Modelaciones desarrolladas en la validación	103
Tabla 3-14. Clasificación del BBS según Van Rijn et al. (2003).....	105
Tabla 3-15. Resumen de simulaciones a soluciones propuestas.....	110
Tabla 4-1. Resumen de análisis de sensibilidad para validación del modelo estacionario	116
Tabla 4-2. Resumen de análisis de sensibilidad para validación del modelo surfbeat	119
Tabla 4-3. Resumen de sensibilidad del parámetro lwave	125

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

A pesar de que actualmente las áreas costeras corresponden a tan solo un 8% de la superficie terrestre, de acuerdo con (Lavalle et al., 2011) dos tercios de las grandes ciudades se localizan en la costa, albergando aproximadamente al 70% de la población mundial y generando importantes divisas por las actividades económicas allí desarrolladas. Tal es el caso de los países de la región Caribe, donde no sólo destacan el turismo de playa sino también la extracción de petróleo y actividades de pesca como los sectores más representativos.

Gran parte de las playas del mundo están siendo afectadas por un proceso erosivo que degrada sus condiciones estéticas y su valor de uso ecológico, económico y social, aunadas a las modificaciones geomorfológicas al paisaje causadas por fenómenos regionales y locales que intervienen en diversas escalas temporales. Para su mayor entendimiento resulta imprescindible profundizar en el conocimiento del funcionamiento del sistema costero, lo cual permitirá diseñar estrategias de restauración y/o resiliencia adecuadas.

El departamento de La Guajira, ubicado en el Caribe colombiano, ha sido considerado como una zona de gran interés desde el punto de vista socioeconómico debido a los múltiples beneficios que se derivan de la explotación minera, turismo, la pesca artesanal e industrial, ubicándolo entre los departamentos con gran representación para el PIB de Colombia. Sin embargo, estas actividades al igual que para muchos países de Latinoamérica vienen acompañadas de modelos de desarrollo que afectan negativamente los ambientes marino-costeros, con actividades antrópicas que conducen a la erosión costera.

A lo largo de los 30 municipios costeros que conforman la región del Caribe colombiano se han presentado tendencias erosivas importantes que se encuentran asociadas a factores tales como: a) falta de sedimentos para mantener el equilibrio o dar origen a nuevas playas; b) cambios en las condiciones hidrodinámicas; c) ascenso en el nivel del mar; d) fenómenos geológicos regionales locales; e) expansión humana desorganizada y los fenómenos que ésta trae consigo (Rangel-Buitrago, 2009) .

Atendiendo a la necesidad que están presentado las zonas costeras en el Caribe colombiano se hace necesario definir acciones que lleven a alternativas de solución sustentables y sostenibles en el tiempo.

Como una propuesta hacia la definición de alternativas que ayuden a mejorar el entendimiento de los procesos costeros y con el ánimo que sirva de base fundamental para la toma de decisiones asociadas a medidas de intervención en la zona litoral, se presenta una investigación que busca analizar el efecto de las diferentes configuraciones de protección costera existentes en la literatura para: a) cuantificar su efecto en el comportamiento de la evolución del perfil; y b) mostrar la relación de éstas con los procesos de erosión costera, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la media Guajira de Colombia. Sin duda, esta investigación será clave para generar conciencia en los tomadores de decisiones de las implicaciones que tiene el hecho de implementar una medida mitigación, mostrando a corto y mediano plazo sus efectos en el frente de playa.

Ahora, en el mundo existen pocas investigaciones de este tipo, un ejemplo de ellos es el estudio de Di Leonardo & Ruggiero, (2015) que describen y cuantifican la variabilidad morfológica del perfil y en especial las barras en una escala regional y explora las variables ambientales que pueden influir en la variabilidad de éstas, sin embargo, en sus estimaciones no tuvieron en cuenta el efecto de las estructuras de protección costera.

La información obtenida con el desarrollo de este proyecto de investigación tiene un amplio marco de aplicación a nivel ingenieril por tanto, el aporte más significativo sería que mediante modelación numérica se puede obtener consideraciones del comportamiento de la evolución de un perfil ante la presencia de estructuras de protección costera y a su vez la influencia en los procesos erosivos, convirtiéndose en una herramienta útil en la ingeniería costera para el diseño de soluciones de problemas en la zona litoral.

A partir del análisis de clima marítimo se conocerán las características de viento y oleaje de la región, la variación del nivel medio del mar, batimetría y propiedades del sedimento. Esta información sirve para alimentar el software XBeach teniendo como objetivo determinar en primera instancia la capacidad del modelo hidrodinámico para representar la variación del perfil tanto para eventos meteorológicos extremos como condiciones climáticas moderadas.

Posteriormente se llevará a cabo una modelación con diferentes configuraciones de estructuras de protección costera que incluyen la aplicación de estructuras verdes (adaptación de las soluciones con el ecosistema) y las estructuras presentes en la zona de estudio que fueron construidas para que el ecosistema se adapte a ellas, con el fin de conocer la influencia que puedan tener sobre la evolución del perfil y estas a su vez en los procesos de erosión costera en el caribe colombiano.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de la evolución de un perfil ante el establecimiento de infraestructura costera con diferentes tipologías, de tal forma que sea posible evaluar la sensibilidad el modelo numérico ante las condiciones de tormenta del caribe colombiano

1.1.2 Objetivos Específicos

- Describir y cuantificar la dinámica de la evolución de un perfil ante las variaciones climáticas del Caribe colombiano
- Analizar los efectos de las estructuras existentes en el desequilibrio de la dinámica costera
- Analizar la incidencia de las barras sumergidas artificiales en la mitigación de los procesos de erosión costera de la playa del municipio Riohacha (La Guajira) durante eventos extremos.
- Proponer medidas de solución que ayuden a mitigar los actuales problemas de las costas de la ciudad de Riohacha

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la importancia que tienen las playas del Caribe colombiano como atractivo turístico y consciente de que los procesos erosivos del litoral costero constituyen un problema grave, es de índole prioritario realizar investigaciones que generen la información y conocimientos necesarios para que las entidades gubernamentales que buscan su preservación, puedan tener herramientas para la implementación de medidas de restauración y acciones correctivas, de tal forma que las playas conserven su estructura y composición, para su aprovechamiento social y económico (turismo, pesca) especialmente en el distrito de Riohacha, departamento de La Guajira.

En los últimos años ha existido cierta preocupación por la pérdida de playa y la destrucción de las defensas costeras naturales debido a los fuertes procesos erosivos que afectan la costa norte de Colombia. Particularmente sectores como El Pájaro -Manaure, Cabo de la Vela y Riohacha, en el departamento de La Guajira se han visto afectados por altos procesos de erosión donde sus habitantes reportan peligro en sus viviendas y estructuras urbanas.

La península de La Guajira se ha caracterizado por la forma como sus habitantes enfrentan la erosión. Por lo general en la mayoría de los casos estos procesos naturales agudizados por actividades antrópicas son contrarrestados con la construcción de obras de defensa sin realizar ningún estudio de la dinámica y morfología costera, son construcciones empíricas que en la totalidad de los escenarios tienden a extremar los problemas erosivos como los reporta Rangel-Buitrago & Anfuso (2013) en su estudio de morfología y morfodinámica de la península de La Guajira

Otro problema que contribuye al deterioro de estas playas lo reporta Márquez & Rosado, (2011) en un estudio donde muestra que las actividades antrópicas generan impactos negativos por el arrastre de materia orgánica en aguas de escorrentías y la acumulación de residuos sólidos generados por el uso recreacional o depositados por las mareas y el oleaje. Además, hay que sumar a esta problemática la construcción sobre el río Ranchería de la represa El Cercado en Fonseca (La Guajira) que con la retención del flujo y los sedimentos exacerba la pérdida de equilibrio de las playas de Riohacha

Con el fin de revertir dicha problemática se encuentra este trabajo de investigación, el cual explora y profundiza en el conocimiento entre la relación de las ondas que se propagan hacia la costa, el tamaño del sedimento y la evolución del perfil, con el

ánimo de evaluar la pérdida de equilibrio del perfil de playa en el distrito de Riohacha, Caribe Colombiano, y demostrar mediante modelación numérica que las estructuras existentes en la zona de estudio no han servido para mitigar los procesos erosión, lo anterior como primer paso y herramienta útil para la gestión y manejo adecuado de las zonas costeras.

1.3 FORMULACIÓN DE PREGUNTAS E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

En esta sección se exponen las diferentes preguntas e hipótesis que surgieron para el desarrollo de la presente investigación

- **Pregunta 1.**

¿Qué modelo matemático representa de manera aproximada la relación de los frentes de onda, el tamaño del sedimento y la evolución del perfil, y permite la evaluación de la pérdida de equilibrio del perfil de una playa?

- **Hipótesis 1**

La morfología de una playa depende de las características de los aportes sedimentarios (tamaño, distribución espacial, densidad y composición de los granos y las condiciones hidrodinámicas actuantes, principalmente los cambios del nivel del mar y la acción del oleaje durante los eventos extremos, para lo cual se pueden aplicar modelos matemáticos que definan la relación de las condiciones oceánicas, climáticas y los mecanismos de transporte de los sedimentos

- **Pregunta 2**

¿Existe una variación tan compleja del contorno submarino en la playa de estudio que conduzca a la implementación de un modelo capaz de reproducir la evolución batimétrica detallada del perfil?

- **Hipótesis 2**

Las barras generadas en un perfil de tormenta por lo general se presentan en playas que se localizan cerca de una rica fuente de suministro, por tanto, se utilizan modelos matemáticos para obtener información de la zona debido a las complejidades ya sea por la dificultad o peligro de realizar mediciones.

▪ **Pregunta 3**

¿El proceso erosivo que afecta las playas de Riohacha estará dominado por la pérdida de la influencia de la evolución del perfil o está asociado netamente al desarrollo de infraestructura costera?

▪ **Hipótesis 3**

Las barras generadas por la evolución del perfil funcionan como sistemas naturales de defensas de la playa que pueden reducir la cantidad de energía contenida en el oleaje de una tormenta determinada, eso repercute en el proceso erosivo y las estructuras costeras son diseñadas con el fin de restaurar las playas afectadas, para lo cual se pueden simular escenarios que definan la relación de las barras y las estructuras de protección en procesos de erosión costera.

1.4 ANTECEDENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO

Anteriormente en el documento se han mencionado una serie de razones con el fin de justificar el interés que suscita el estudio general de la dinámica de los sistemas costeros y en particular los eventos generados en las playas, tales como las barras generadas por los procesos físicos en los ambientes costeros.

En las costas colombianas han sido escasos los estudios realizados que incluyen temas morfodinámicos, hidrodinámicos y sedimentológicos; y hasta la fecha ningún estudio ha modelado la evolución morfodinámica resultante de diversos procesos naturales y antrópicos en diversas escalas de tiempo y mucho menos se reportan investigaciones acerca de la evolución del perfil ante estructuras costeras. Se puede citar algunas estudios encontrados en la literatura como las de Rangel-Buitrago & Posada-Posada, (2005) y Correa & Vernet, (2004) que centraron sus estudios en el análisis exhaustivo de la geomorfología y procesos erosivos de distintos sectores del Caribe colombiano. Rangel-Buitrago & Posada-Posada, (2005) utilizó perfiles batimétricos, fotografías aéreas y muestras de sedimentos de playa, zona submareal y plataforma somera pero no detalla la hidrodinámica ni la morfodinámica resultante de la playa. En el trabajo realizado por (Arrieta et al. 2009) se analizan las tasas de retroceso de la línea de costa en la isla de Tierra Bomba, Cartagena de Indias, basados en imágenes aéreas, perfiles de playa y líneas de costa topográficas, en su investigación se tuvo en cuenta la evolución del oleaje simulado con el modelo Swan.

Restrepo et al. (2005) realizaron un levantamiento de información primaria (mediciones de perfiles batimétricos, descripciones morfológicas, ensayos granulométricos, líneas de costa etc.) para caracterizar la hidrodinámica en la zona comprendida entre Punta Caribana y el delta del Sinú con el fin de conocer y entender los graves problemas de erosión costera de la zona mediante simulación morfodinámica con el modelo COPLA, y de tal forma evaluar diferentes alternativas de solución para la protección costera de este sector de la costa Caribe colombiana. Concluyendo que la mejor alternativa de solución son los diques exentos ya que generan zonas de playa en todas las zonas críticas y podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero.

Rangel-Buitrago & Anfuso, (2013) efectuaron levantamientos geomorfológicos, perfiles de playa y muestreos sedimentológicos en tres (3) sectores de la Península de La Guajira con el objetivo de determinar el estado morfodinámico de las playas y las tendencias erosivas de las playas. Como resultado reportan que las playas corresponden a tipos morfodinámicos intermedios y disipativos, variando a lo largo

del año y dependen principalmente de la pendiente del perfil, así como de los cambios en el tamaño de grano de los sedimentos. En cuanto al análisis histórico, las líneas de costa mostraron tendencias erosivas significativas de hasta 2 m/año. Dichas tendencias afectan los distintos elementos que conforman el litoral (i.e. estructuras de protección costera, obras civiles y una amplia variedad de ecosistemas).

Por otra parte Castillo & Gamarra, (2014) Reportaron que la tendencia general de la línea de costa es erosiva, con zonas de acreción generadas por obras antrópicas artesanales desarrolladas por los nativos. Siendo la tasa máxima de erosión encontrada es de 2.22 m/año.

1.5 ESTADO DEL ARTE

La morfología del fondo marino en aguas someras se encuentra relacionada con procesos costeros derivados de la acción del oleaje, las mareas y las corrientes. Las variaciones en los patrones de corrientes y los niveles medio del mar originan formaciones rítmicas de pequeña y gran escala.

Las barras generadas por la evolución del perfil son depósitos de arena que modifican la respuesta morfológica de la playa ante condiciones hidrodinámicas actuantes, constituyen un elemento importantísimo dentro de este sistema costero y por tal razón son diversas las aproximaciones que se han realizado para el entendimiento de los procesos de las barras y cómo estos afectan la dinámica del perfil sumergido. Di Leonardo & Ruggiero, (2015) describen y cuantifican la variabilidad morfológica de las barras de arena en una escala regional y exploran las variables ambientales que pueden influir en la variabilidad de estas, utilizando 560 transectos transversales individuales, entre las ocho (8) celdas litorales existentes en el Noroeste del Pacífico de los Estados Unidos. Encontraron que la profundidad de la barra es espacialmente consistente, con un límite de aproximadamente 7 m. Las profundidades medias de la cresta de las barras de arena para la mayoría de las celdas litorales examinadas no fueron estadísticamente diferentes. Las correlaciones encontradas arrojaron relaciones significativas entre la pendiente y la posición de la barra y también entre el rango de profundidad, la altura de ola en rotura, así como entre la longitud de onda y el rango de profundidad. Además de la incidencia de la inclinación de la pendiente superior de la costa en la disminución de las posiciones de las barras desde la línea de costa. Reportan no encontrar correlaciones significativas entre la morfología de barras y el rango de mareas, tamaño del grano, dirección y potencia de la onda.

Por otra parte, la morfología de las barras de arena reflejan el estado global de la zona costera por ejemplo Price & Ruessink, (2011) utilizaron un conjunto de datos de 9,3 años de imágenes de exposición de la baja marea en la costa norte de Australia, para caracterizar la dinámica del estado de un sistema de doble barra de arena, los dos estados extremos; disipativo (D) y reflejantes (R), y los cuatro estados intermedios; barras longitudinales (LBT), barras rítmicas (RBB), barras transversales y retorno (TBR) y terraza bajamar (LTT), identificaron dos estados de barras intermedias adicionales. Mostraron que la barra transversal erosiva y retorno (eTBR), estado está relacionada con el ángulo oblicuo de incidencia del oleaje dominante en la zona de estudio y la terraza rítmica bajamar (rLTT), y con la configuración de la barra múltiple. Asimismo, encontraron que la barra exterior en su mayoría de las veces estaba en el estado TBR y secuencialmente avanzaba generalmente a través de los estados LBT-RBB-TBR- eTBR -LBT, con transiciones ocasionales al estado disipativo. En cuanto a la barra interior se distinguen dos tipos de comportamiento, basándose en el estado de la barra exterior.

Muchas características observadas de las barras de arena se han logrado reproducir mediante simulaciones teóricas y computacionales, particularmente la transición de la forma lineal a crecscéntica y la migración de la barra a tierra, por ejemplo, Ribas et al. (2011) aplicaron un modelo morfodinámico (MORFO60) que describe la retroalimentación entre ondas, las corrientes promediadas en la profundidad, la elevación de la superficie libre y la evolución del fondo para entender la formación de las barras sumergidas cerca de la costa y la influencia de la dinámica del flujo que viaja aparte sobre la ola, conocido como rodillo (en inglés roller) en su formación en Noordwijk, Países Bajos. Encontrando que la longitud de onda, la orientación de la cresta y la tasa de crecimiento modeladas coinciden con las barras observadas, pero el modelo sobreestima la tasa de migración; alrededor de 1,5 veces más grande que la tasa máxima detectada en el campo (0,9 m/h). La longitud de onda y las tasas de migración de las barras crecscénticas en caso de incidencia oblicua del oleaje se simulan con mayor precisión si la corriente litoral de referencia se modela incluyendo la dinámica de los rodillos (rollers) porque observaron que la longitud de onda modelada (del orden de 500 m) y tasa de migración (de unos 4 m/h) coinciden cualitativamente con los datos de barras crecscénticas observados en la zona de estudio.

Ruessink et al. (2015) en la región central de Delta Flume, Países Bajos mediante modelación numérica y mediciones de laboratorio estudiaron los cambios de migración de barras de arenas y cambios en la zona de rotura desarrollando pruebas con diferentes condiciones de oleaje y nivel de agua. Encontraron que la dinámica de la barra en respuesta a ondas erosivas irregulares ($H_s = 0,8$ m, $T_p = 8$ s) y diferentes niveles del mar ($h_s = 3$ y $2,5$ m, respectivamente) se forma a una

tasa que va del 15 al 20% de la incidencia del oleaje, luego de haber erosionado la barrera de arena. En cuanto al modelo unidimensional promediado en la fase desarrollado por Dubarbier et al., (2015) con el fin de evaluar el cambio de perfil de playa de arena en escalas de tiempo de horas a meses y utilizaron las observaciones de las migraciones de las barras de arena en la duna y playa sumergida de perfiles de playas en Duck (Carolina del Norte, EE. UU.) y Egmond (Países Bajos) para evaluar el modelo. Presentando un puntaje de habilidad de error cuadrático medio, por sus siglas en inglés (MSESS o BSS) cercano de 0 en la primera parte de la simulación puesto que el modelo recrea de forma lenta la formación inicial de la barra de arena, aumentando a un BSS de 0,75 finalizando la modelación ya que la barra de arena predicha empezó a parecerse a la barra de arena observada. Aunque reportan que el modelo no funciona bien en la zona de rotura por el aumento poco realista en las tasas de transporte neto.

Tiessen et al. (2010) utilizaron un modelo morfodinámico de estabilidad lineal (Morfo60) para describir el desarrollo de patrones de barras crecscénticas y canales de retorno en una costa abierta de Carolina del Norte, EE. UU. Compararon las predicciones del modelo con observaciones de campo usando la técnica de imágenes Argus realizadas durante el mismo periodo simulado. Los resultados reportados indican que las observaciones de campo y las predicciones del modelo muestran escalas de longitud similares en los patrones de las barras crecscénticas inmediatamente después de una tormenta, pronosticando grandes escalas de longitud, con rangos de 500 a 800 m aproximadamente. Luego de un par de días disminuyen alrededor de 150 a 400 m, hasta que se produce la siguiente tormenta. Sin embargo, encontraron que las predicciones del modelo muestran más fluctuaciones en la escala de longitud pronosticada que las observadas en campo. Las cuales se deben a variaciones en las condiciones de las olas y el nivel de las mareas y falta de un análisis de estabilidad lineal en patrones de barras preexistentes.

Fernández-Mora et la. (2015) presentan un nuevo modelo morfodinámico basado en procesos, que incluye el transporte debido a la asimetría de velocidad y aceleración, así como una nueva formulación para movimientos intra-ondas. Simularon con éxito la migración de barras de arena en tierra e indican que el balance de la acción conjunta de la asimetría de velocidad y aceleración provocan una mejora importante en la modelación de la migración de las barras en tierra y es esencial para modelar con precisión la evolución de todo el perfil inferior de la costa transversal, cuando se compara con las observaciones. No obstante, el modelo se limita a la evolución del perfil de playa, sin tener en cuenta que las variaciones de la batimetría a lo largo de la costa inducen fluctuaciones en las propiedades de las ondas y corrientes, afectando el transporte transversal y originando gradientes en

el transporte litoral, que han sido ignorados por la suposición de la uniformidad de la playa.

Con el fin de superar las anteriores limitaciones Kim et al. (2017) en su trabajo propuso un modelo para el análisis morfodinámico de la migración de barras arena en tierra y mar basado en un enfoque integrado en la profundidad. Usa las ecuaciones de Boussinesq para simular el flujo en la costa y la evolución morfológica fue simulada mediante la ecuación de transporte de sedimento suspendido, y la ecuación de carga de fondo basada en la velocidad instantánea y la aceleración. El modelo propuesto se aplicó a las condiciones acreciente y erosivas. Reportan que el modelo simula razonablemente la migración de barras de arena en tierra y mar, y la formación de una berma alrededor de la costa. Los autores reconocen que el modelo no debe aplicarse alrededor de las estructuras costeras, donde la escala vertical es tan importante como la escala horizontal y el tamaño de grano no es uniforme.

De Schipper et al. (2014) investigaron cómo afecta el estado de mar (diferentes alturas de olas y periodos) en el tiempo de formación de las barras de arena, donde la temporalidad de formación y efectos de una tormenta son variable de una playa a otra. Para ello llevó a cabo una modelación numérica con el software Delf3d para de examinar el impacto del periodo pico, frecuencia de difusión y propagación direccional en la formación de las barras. Los resultados encontrados indican que un aumento en el periodo de la onda tiene un efecto importante, cambiando el tiempo de formación de hasta (250%) en el escenario de cambiar el periodo de ola representativo de la costa holandesa (periodo pico de 5-6 s) por un valor del sureste de la costa australiana (periodo pico de 10-12 s). Por el contrario, la propagación direccional y la frecuencia del campo de ondas solo realizan un menor cambio en el tiempo de formación. Concluyen que el desarrollo y variación de las barras de arena puede ser mayor en costas abiertas dominadas por oleaje tipo Swell (banda estrecha), debido principalmente a la presencia de periodos de oleaje más largos. Adicionalmente en una playa dada, la llegada de una onda de periodo largo en un tiempo posterior al paso de la tormenta aumenta la variación de las barras.

Las escalas de tiempo de las tormentas, de orden de horas a pocos días y la escala estacional, del orden de semanas a meses son las escalas temporales y espaciales respectivamente más importantes en los modelos de perfil, y el comportamiento de las barras en escala estacional es de una migración cíclica, moviéndose hacia el mar durante la estación de invierno (oleaje de mayor energía) y hacia la costa (oleaje de menor energía) en la recuperación de la playa en la estación de verano. Hay que resaltar que el grado de estacionalidad es altamente variable y no en todas las costas del mundo se presenta de la misma forma, por ejemplo Angnuureng et

al. (2017) investigaron el impacto de las tormentas y las agrupaciones de tormenta en la recuperación de la costa en una playa con barras en el suroeste de Francia, con meso a macro marea, mediante el uso de imágenes de video. Para el análisis fueron evaluadas 36 tormentas individuales y 13 grupos de tormenta y encontraron que la recuperación está fuertemente modulada en primera instancia por la amplitud de la marea (2 a 5 m) y en segundo lugar por la ubicación de dos barras; una exterior, que a menudo presenta patrones crecénticos, mientras que la barra interior en el dominio intermareal se exhibe como una barra transversal con intensas corrientes de retorno hasta con longitud de onda media de alrededor de 400 m, permitiendo así, que el tiempo medio de recuperación de las playas tras la afectación de una tormenta sea de 9 días.

En la misma zona Senechal et al. (2015) a partir de tres años de observaciones de vídeo para las llamadas tormenta de invierno (eventos con altura de ola significativa mayor a 4 m de al menos 12 h de duración) encontró que el rango de variación de la ubicación de la barra de arena interior (120 m) es dos veces y media mayor que el intervalo de variación de la línea de costa y que la rápida erosión de la costa se puede observar en condiciones moderadas. Almar et al. (2010) en la misma zona utilizaron cinco semanas de imágenes de vídeo de 10 minutos cada hora para analizar las barras bajo condiciones de intenso oleaje. Hallaron que la presencia de la barra submareal responde a la permanencia del estado de playa barras transversales y retorno con un tiempo de residencia promedio de aproximadamente 24 días y con un máximo de 103 días, incluso durante condiciones de alta energía como se informa de otros ambientes similares.

La dinámica y el transporte potencial de sedimentos es una característica clave de la hidrodinámica costera y tiene un papel importante en la protección de la costa; como se mencionó anteriormente el forzamiento moderado del oleaje contribuye a la formación de barras, mientras que las tormentas inducen la migración de la barra hacia mar abierto y los experimentos de campo no suelen permitir una descripción de la evolución del perfil por la pobre resolución temporal en los levantamientos topográficos. Razón por la cual Grasso et al., (2009) describe el proceso de formación y evolución de barras en varias posiciones sobre el perfil con experimentos en un canal de 36 m de longitud equipado con un generador de ondas de pistón. La pendiente del fondo consiste en un material suelto de baja densidad ($1,19 \text{ g/cm}^3$) con un diámetro medio $D_{50} = 0,6 \text{ mm}$. El parámetro de Shields y los números de Rouse para los experimentos son de similar magnitud a los encontrados en ambientes naturales. Las ondas irregulares fueron generadas a partir del espectro Jonswap. Las pruebas de laboratorio permitieron encontrar que para oleaje constante de largas duraciones (decenas de horas) las barras se inclinan hacia adelante y finalmente se fusionan a la berma. En cuanto a la modelación de eventos

de tormenta fue aplicada una sucesión creciente y decreciente de energías, observando una migración hacia altamar durante la fase más energética.

Las estrategias de protección de playa y de reconstrucción de la línea de costa están a la vanguardia en la ingeniería costera, por tanto Grasso et al., (2011) analizó a través de cuatro (4) simulaciones las afectaciones de las fases de una tormenta (creciente, cima y decreciente) a diferentes partes de un perfil de una playa alimentada artificialmente, donde encontró que la segunda fase de la tormenta en todas las simulaciones induce a altas tasas de transporte de sedimentos hacia aguas profundas, erosión en el frente de playa y creación de barras en la zona exterior de la playa. Además, concluyeron que el crecimiento de la barra a través de la alimentación sucesiva intensifica el rompimiento de las olas alejada de la línea de costa, reduciéndose la zona surf, es decir que la barra actúa como un filtro de onda y reduce la erosión de la costa (efecto de sotavento).

Demirci & Aköz, (2012) desarrollaron experimentos sobre el transporte transversal de sedimentos en la costa en un canal de oleaje con condiciones de tormenta para estudiar las características geométricas de las barras de arena. Los resultados experimentales indicaron que al aumentar la pendiente de aguas profundas (H_0/L_0) se tiende a incrementar el movimiento neto de las barras hacia costa afuera. Adicionalmente con la creciente del peralte de las olas se induce un movimiento de las barras arena para acrecentar las distancias verticales desde el nivel medio del agua hasta los puntos de inicio (X_b), punto final (X_s) y de la cresta (X_i) de la barra. Asimismo, demostraron que las distancias horizontales desde los puntos de inicio y fin de la barra hasta la línea de costa aumentaron con la disminución de la pendiente de la playa.

Cobos et al. (2017) llevaron a cabo un estudio experimental de la dinámica de ondulación y barra de arena bajo ondas regulares e irregulares en condiciones parcialmente reflejantes. Realizando una serie de experimentos a pequeña escala para reproducir el crecimiento y la migración de las formas de fondo. Encontraron que la evolución y la dinámica de la geometría de la barra de arena están asociados a procesos más lentos que la evolución de las ondulaciones, aparte que estaban regidas por el campo de onda, las condiciones de reflexión, y las características del sedimento. Observaron diferencias significativas entre las barras de arena bajo ondas regulares e irregulares debido a que las barras bajo un oleaje regular mostraron depresiones planas o casi planas. Por el contrario, las barras bajo ondas irregulares estaban casi uniformemente cubiertas por ondulaciones y bajo ondas parcialmente reflejadas se presenta un efecto modulador de las barras de arena sobre las características de las ondulaciones (crecimiento, forma y celeridad de migración).

Nielsen & Shimamoto, (2015) en base a los experimentos desarrollado por Kraus y Larson (1988), el único estudio de desarrollo de perfil de playa a gran escala con mareas y suficiente densidad temporal para analizar la respuesta del nivel de la cresta de la barra en escalas de tiempo menores a 1h, reportaron que la escala de tiempo morfológica para la respuesta del nivel de la cresta de la barra externa a los cambios en el nivel de agua por la marea es notablemente corta, alrededor de 15 minutos para el único experimento prototipo conocido por los investigadores. Sin embargo, resaltaron que esta experiencia requería más experimentos de laboratorio y de campo con suficiente tiempo de resolución, siendo así, un gran reto para los modelos de desarrollo de barras bajo ondas regulares.

Las barras de arena generada por la evolución del perfil proporcionan una protección natural a las playas al incidir en que las olas se disipen lejos de la línea de costa a través de la rotura inducida por la profundidad, reduciendo la energía del oleaje en la zona litoral y es necesario entonces, emplear diferentes metodologías de estudio con el fin de entender su proceso de evolución, como es el caso de Arifin & Kennedy (2011), quienes trabajaron con batimetría LiDAR aerotransportada (ALB) para cuantificar las propiedades y la evolución de las barras crecscénticas a escala de kilómetros en el norte del Golfo de México, antes y después de los huracanes Iván, Dennis y Katrina. Hallaron que los cambios morfológicos siguen la clasificación de Wright y Short (1984) hasta cierto punto. Afirman que las escalas de tiempo de generación parecen mucho mayores de lo que típicamente se ha reportado; por ejemplo, longitudes de 1000 m de línea de costa se desarrollaron en escalas de meses o años en lugar de días o semanas. Debido a que el orden de magnitud difiere en las condiciones extremas, durante los ciclones tropicales se generan barras en aguas relativamente profundas, y en condiciones típicas del Golfo (olas pequeñas) se desarrollan barras crecientes. Adicionalmente, se puede requerir más de un huracán toque tierra de forma directa para eliminar por completo estas características de las barras crecientes. Asimismo, encontraron que barras rítmicas de longitud de onda relativamente corta (100 m) comienzan a desarrollarse cerca de la línea costa a profundidades de 1-3 m, con escalas de tiempo del orden de días o semanas. La barra de la tormenta más profunda cambia poco durante este tiempo y la de menor escala se puede restablecer y reconstruir con pequeñas tormentas más o menos independiente de los fenómenos de mayor escala.

Aleman et al. (2013) estudiaron la dinámica interanual de las barras de arena utilizando perfiles batimétricos 2D e imágenes 3D LiDAR en las playas de Languedoc, Francia. Permitiéndole determinar los sistemas de barras de arena afectados por la migración neta costa afuera (NOM). Observaron que, a escala regional, las condiciones necesarias para el desarrollo de la NOM dependen de la morfología de las barras (crescénticas o rectas), de la energía del oleaje, la

orientación de la costa asociada (baja o alta energía, área protegida), las estructuras costeras (defensas portuarias y costeras) y la cantidad de sedimentario cercano a la costa. adicionalmente, encontraron que la morfología de la costa cercana y los parámetros de las barras influyen en el comportamiento de las barras en las proximidades de la costa. La interacción entre la pendiente de la costa, el ancho de la barra y la tasa de migración controlan la duración de la NOM, así como el volumen de la barra y el clima regional del oleaje influyen también en la tasa de migración del sistema.

Por otra parte Ruessink et al. (2009) con el fin de demostrar que eventos cuyas alturas de olas exceden de 3 a 4 veces el promedio anual pueden desencadenar un comportamiento NOM similar a observadas en otros lugares. En este sentido, analizaron un conjunto de datos de aproximadamente 7,5 años de imágenes de vídeo con un tiempo de exposición de 10 min diarios de oleaje en una playa dominada por doble barra en Gold, Australia. Observaron que la barra exterior tras los oleajes más energéticos migró de 75-100m más lejos de lo habitual de la línea de costa y luego lentamente decayó durante la migración en tierra en las semanas subsiguientes de baja energía. Concluyen al final que el tamaño de la barra (altura y ancho) puede controlar si un sistema de barra sumergida múltiple presenta NOM episódica (como lo evidenciaron en las playas de Gold) o NOM interanual. A diferencia de la NOM interanual, la primera está dirigida por el orden de los eventos de tormenta.

Aleman et al. (2015) se enfocó en el uso de datos topo-batimétricos LiDAR 3D de muy alta resolución en el golfo de León, Mediterráneo, para representar los estados de las playas y sus transiciones ante diferentes condiciones climáticas, por la buena precisión que presenta a escala regional en comparación con las tecnologías tradicionales. Hallaron que la distribución a lo largo de la costa de los estados de las playas y los tipos de barras asociadas a escala regional están relacionada con la variabilidad de las condiciones hidrodinámicas (incidencia de las olas y energía) y las características de los sedimentos (tamaño de partícula). Sin embargo, la influencia de estos parámetros en el estado de la playa parece ser controlada en gran medida por el contexto geológico tal como la presencia de desembocaduras de ríos. Asimismo, encontraron que los rompeolas tienen impactos muy locales sobre la morfología de las barras, donde dichas barras están interceptadas por espolones y generan sólo ligeros cambios en la pendiente subacuática.

Continuando con la revisión de literatura muchos autores han identificado una articulación entre la barra de arena y la costa y recientemente se han explorado mediante el uso de imágenes de vídeo. Van de Lageweg et al. (2013) en una playa arenosa micromareal en la bahía Tairua, Nueva Zelanda, investigaron cómo el

espaciamiento entre la barra de arena y la línea de costa, y con la rotación de éstos pueden jugar un papel importante en el control de la naturaleza y los cambios temporales durante el acoplamiento de la barra de arena con los cambios en la costa. Los resultados obtenidos ayudaron a realizar una valoración del acoplamiento entre la barra de arena y la costa, que es una característica dominante en el modelo de estado de playa de Wright y Short (1984). Este acoplamiento está directamente relacionado con la pequeña separación entre la barra de arena y la costa, asimismo con el grado de rotación de la barra se controlan las características del patrón de acoplamiento barra-costa, y según los autores este comportamiento está influenciado por la energía de las ondas entrantes.

Armaroli & Ciavola, (2011) estudiaron con tecnología Argus (un procedimiento automático de imágenes) la evolución morfodinámica de las barras cercanas a la costa en una playa de baja energía al norte del Mar Adriático en Italia, bordeada en el norte por estructuras costeras y en el extremo sur por un río. En su investigación acerca de la cresta de la barra, fue aplicado un procedimiento de mapeo con transectos transversales a la costa con imágenes de video. Para evitar errores en el espaciamiento de las barras, se llevó a cabo una comparación de levantamientos batimétricos históricos. Los resultados permitieron observar que la playa sumergida se caracteriza por presentar una sola barra en la zona próxima a las estructuras de protección costera pero también en el extremo sur se presentan barras interiores y exteriores en movimiento. La morfodinámica de la barra exterior y su forma plana fueron dominadas por formas rítmicas que luego de eventos de alta energía se convirtieron en barras rectilíneas, pero durante los siguientes periodos de baja energía se restableció su ritmicidad, apoyando la hipótesis de los mecanismos que tienen las barras de arena de reorganizarse tras el paso de un evento extremo, termino conocido como autoorganización.

Castelle et al. (2015) investigaron la costa Gironde, suroeste de Francia, expuesta a las condiciones de oleaje energética de alta intensidad y mediante una inspección visual detallada de imágenes satelitales y fotografías aéreas mostraron cómo la barra interna se acoplaba a los megacusps durante las condiciones de onda de energía moderada. De igual forma observaron que después de la tormenta 'Hércules', la barra interior era más bien plana y acoplada a la barra exterior con secciones de barra interior que sobresalían frente a cusps de la barra exterior y con la notable ausencia de canales de retorno en la barra interior. Este acoplamiento fue similar al acoplamiento fuera de fase observada por Price et al. (2013) en la Costa Australiana, quienes usaron un modelo 2DH morfodinámico no lineal con forzamiento invariante en el tiempo. Para las simulaciones utilizaron datos hidrodinámicos y batimétricos realistas derivados de las observaciones de videos de las barras exteriores crecientes. Al final concluyeron que la morfología anterior

de la barra exterior y las características del oleaje de tormenta (período y ángulo de incidencia), gobiernan los patrones de erosión de las playas y las dunas a lo largo de las costas arenosas con múltiples barras durante las tormentas severas.

Continuando con Phillips et al. (2017) que cuantificaron la variabilidad temporal de la recuperación de una costa arenosa y altamente energética mediante el uso de imágenes de video, con mediciones de 10 años de las posiciones diarias de las barras de arena en las playas de Narrabeen-Collaroy, Australia, y con el fin de determinar la influencia de las ondas cercanas a la costa y la evolución morfodinámica del perfil sobre la variabilidad de las tasas de recuperación de la línea de costa. Los hallazgos fueron resumidos en un nuevo modelo conceptual para caracterizar las fases temporales y las tasas de recuperación costera correspondientes a las etapas de migración de la barra de arena en tierra después de una tormenta, cada fase está asociada con etapas de migración de la barra en tierra después de una tormenta incluyendo la morfología de una barra semi-unida, unida y ausente de la costa. Adicionalmente, encontraron que las tasas más rápidas de recuperación de la costa se producen cuando las barras de arena están más cerca y unidas a la costa, en promedio de 3 a 4 veces mayor que para las barras de arena separadas. Por otra parte, concluyen que en condiciones con barras unidas y semi-unidas, las tasas de recuperación de la línea de costa están negativamente correlacionadas con el forzamiento de la pendiente de la ola y la velocidad de caída adimensional junto con las tasas de migración de la barra en tierra.

Para analizar la influencia de la dirección de las olas en la respuesta morfológica de un sistema de doble barra de arena, Thiébot et al. (2012) emplearon el MORFO55, un modelo 2DH no lineal aplicado para la zona surf. Hallando que tanto la longitud de onda de los patrones crecécnicos y el tiempo de respuesta de la barra incrementan al aumentar el ángulo de incidencia del oleaje, es decir, que la respuesta morfológica de un sistema de doble barra sumergida es altamente sensible a la dirección de la onda. En cambio, para las ondas paralelas a la línea de costa, encontraron que los patrones crecécnicos se desarrollan con mayor lentitud y son más grandes a lo largo de la barra externa que de la barra interior. Reafirman lo encontrado en estudios anteriores donde la incidencia oblicua de la onda es de ángulos pequeños ($\theta \leq 11^\circ$ de la cresta de la barra exterior) favorecen la aparición de patrones crecécnicos como inestabilidades libres del sistema, siendo la fuente de estas inestabilidades el acoplamiento "bedsurf", definida como la retroalimentación positiva entre las perturbaciones del fondo y los patrones de rotura de las olas, dando como resultado las circulaciones de las celdas de retorno.

Stokes et al. en el 2015 cuantificaron los cambios estacionales a interanuales de la tridimensionalidad de las barras de arena en la playa de Cornwall, Reino Unido

mediante las predicciones del modelo DST13 al compararlas con el modelo PHH06 e imágenes de video de 5,5 años de mediciones semanales de barras, y de muestreos intermedios mensuales de la playa. Sus análisis demostraron que el modelo explica el 42% y el 61% de la variabilidad total de la barra exterior y la tridimensionalidad de la playa inferior, con un puntaje de habilidad del error cuadrático medio (BSS) de 0,77 y 0,63 respectivamente. El modelo DST13 realizó con habilidad y sin precedentes predicciones de cambios durante una serie de largo periodo, eventos de oleaje de alta energía, incluyendo el período del oleaje más energético medido en los últimos 65 años, el cual tiene duración de 8 semanas. Asimismo, presentaron las primeras predicciones a largo plazo (multianuales) de la tridimensionalidad de las barras de una playa macro mareal, superando un modelo de línea de base simple (un ajuste lineal), así como un modelo de retroalimentación linealizado comparado en la literatura.

Dubarbier et al. (2015) utilizaron un modelo de perfil de playa que acopla oleaje-corriente y transporte sedimento para simular la evolución transversal de una barra en la escala de tiempo de días a meses que comprende migraciones rápidas en alta mar y lentas en tierra para diferentes lugares en Duck (Carolina del Norte, EE.UU.) y Egmond (Holanda). La idea fue analizar los procesos hidrodinámicos dominantes que rigen el comportamiento de las barras de arena en la costa, al discriminarlos por medio de cuatro modos de transporte de sedimentos impulsados por la oblicuidad y asimetría del oleaje, los efectos medios de la corriente y la pendiente de la playa. Encontraron que el nivel del agua por encima de la cresta de la barra influye principalmente en la dirección de migración de las barras, mientras que la oblicuidad de la onda regula la magnitud de las tasas de migración y es crucial para simular con precisión la migración de las barras de arena en alta mar durante las olas de gran energía.

Los procesos que subyacen a la migración transversal de las barras sumergidas cerca de la costa son generalmente estudiados con la ayuda de modelos de evolución batimétrica, sin embargo, tienen dificultades para reproducir el comportamiento natural de las barras de arenas en escalas de tiempo de unos pocos días o semanas y una habilidad incierta en escalas más larga, de meses o años. Siendo una preocupación el uso de modelos en las escalas de tiempo de predicción que superan por mucho la escala de tiempo de los procesos modelados debido a la acumulación exponencial de errores en las ecuaciones de modelos no lineales. Por lo que Pape & Ruessink, (2011) estudiaron el papel de la no linealidad en la predicción del comportamiento de la barra de arena en escalas de tiempo de unos pocos días a varios meses con modelos redes neuronales basados en datos. Para el desarrollo de su estudio contaron con más de 5600 observaciones diarias de la ubicación de las barras de arena y el promedio diario de los forzamientos de

onda en las playas de Gold, Australia y Hasaki, Japón. Identificaron que los modelos redes neuronales son capaces de calcular muchos aspectos del comportamiento de la barra de arena en la costa transversal, tales como la migración rápida en alta mar durante las tormentas, más lento en tierra durante periodo de menor energía, los ciclos estacionales y las tendencias anuales a interanuales orientadas hacia el mar. Por otra parte, concluyeron que durante los periodos con condiciones de menor oleaje se hace más difícil predecir la ubicación de la barra de arena, mientras que, durante olas de mayor tamaño, las predicciones se hacen cada vez más precisa.

Al contrario de la mayoría de los estudios previos de migración de barras de arena Falchetti et al., (2010) simuló con el $k - \epsilon$ módulo de la turbulencia del modelo 1-D General Océano turbulencia (GOTM) que incluye los efectos de la estratificación inducida por los sedimentos la migración de las barras de arena cerca de la costa observada en la playa Outer Banks, Carolina del Norte. Los resultados del modelo sugieren que las predicciones de la migración de la barra cerca de la costa, está dominada por el transporte de sedimentos inducido por ondas confinado a unos pocos centímetros del fondo y no se ven muy afectados por los efectos de flotabilidad. Observaron que al no tener en cuenta los efectos de la estratificación inducida por los sedimentos obtienen como resultado una mayor habilidad del modelo durante las olas más grandes. Pero al considerar la migración tanto en tierra como en costa afuera, el modelo que incluye la estratificación inducida por sedimentos tiene mayor habilidad que el modelo sin estratificación.

Teniendo en cuenta la revisión de la literatura y las investigaciones citadas, se observa cómo han empleado diversas técnicas y métodos desde robustos modelos numéricos y levantamientos batimétricos con imágenes de video, LiDAR y satelitales hasta experimentos en laboratorio a pequeña escala para el análisis y estudio del comportamiento de la formación de barras por la evolución del perfil en la escala de días a meses comprendiendo eventos extremos y de oleaje medio y de tal forma determinar su influencia sobre la variabilidad de las tasas de recuperación de la línea de costa, la migración neta costa afuera, el crecimiento y la migración de las formas de fondo.

Sin embargo, en Colombia no se ha evidenciado estudios que determinen el efecto que tienen diferentes configuraciones de solución costera implementadas en el comportamiento de la evolución de un perfil y la relación de éste con los procesos de erosión costera ante condiciones de oleaje extremal y medio.

Con base en las consideraciones anteriores se requiere implementar una investigación que permita determinar la falta información las costas colombianas. Los casos por analizar deberán tener el soporte computacional de modelos

numéricos morfodinámicos que consideren el fondo como frontera móvil y sean forzados por viento, mareas y oleaje. Por tanto, el presente estudio será clave para generar conciencia en los tomadores de decisiones de las implicaciones que tiene el hecho de implementar una medida de mitigación, mostrando a corto y mediano plazo sus efectos en el frente de playa.

.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo busca sentar las bases para el análisis de los procesos morfodinámicos que ocurren en la zona de estudio desarrollados mediante modelación numérica que se presentan en los capítulos posteriores. A continuación, se exponen de manera general los conceptos básicos consultados y desarrollados en las diferentes secciones de este capítulo de la investigación.

En la sección 2.1 se presentan los conceptos de playas y su morfología de forma general, se hace énfasis en el perfil de playa y sus elementos, variación y clasificación desde los estados extremos hasta cada uno de los estados de playa intermedios. Adicionalmente, se muestra la profundidad de cierre y las diferentes ecuaciones para su cálculo teórico, asimismo las escalas espacio-temporal de la evolución de los perfiles de playa y para finalizar esta sección se expone el transporte transversal de sedimentos.

En la sección 2.2 se aprecia la clasificación de los modelos matemáticos de evolución del perfil de playa de acuerdo con diversas tipologías, aunque se hace énfasis en la clasificación según su escala de aplicación y se detallan ciertas habilidades y limitaciones de algunos modelos de evolución de perfil en la escala de corto, mediano y largo plazo.

En la sección 2.3 se presenta la descripción numérica del modelo XBeach detallando como resuelve y cuáles son las ecuaciones de gobierno, el sistema de coordenadas, los tipos de grillas que se pueden usar, las opciones hidrodinámicas implementadas en XBeach y para finalizar esta sección se detalla las diferentes formulaciones y los procesos físicos que el modelo resuelve.

2.1 MORFOLOGÍA DE PLAYAS

Las playas constituyen un sistema dinámico, dando origen a un relieve formado por las condiciones hidrodinámicas actuantes que distribuyen los sedimentos presentes. La morfología de la playa se refiere al estudio de la interacción y el ajuste entre la batimetría, la hidrodinámica marina cercana a la costa, las geoformas del fondo marino y la dinámica del transporte de sedimentos. Siendo los procesos hidrodinámicos; olas, mareas, corrientes inducidas por el oleaje y en menor medida por el viento quienes dominan en gran medida la morfología de la playa. (Short, 1999).

Las condiciones hidrodinámicas, en especial el oleaje, aportan la energía utilizada para movilizar todo el sistema. Los sedimentos presentes en las playas no están exentos a un proceso de selección natural; como resultado solo permanecen de forma estable en la zona costera, aquellos que mejor se adaptan a las condiciones hidrodinámicas y las formas de relieve.

Según Wright & Short (1984) la morfología de una playa y su constante cambio están relacionados con las condiciones climáticas incidentes, además de la generación y transporte de sedimentos que están en función de la forma y tamaño de las partículas de sedimento y estas a su vez de los factores que puedan erosionar las rocas.

La morfología particular de las playas se analiza desde la variación morfológica del perfil y la planta (en tres dimensiones), cada uno con formas características diferentes. Sin embargo, existen playas con cambios longitudinales muy pequeños, lo que permite su estudio en dos dimensiones, pudiendo ser descritas por las características del perfil.

2.1.1 El perfil de playas

El perfil de la playa es la variación del contorno del fondo con relación de la distancia a la línea de costa, en dirección normal a la misma. A diferencia de la variable anterior la profundidad es una variable que cambia con el perfil. Es habitual tomar el nivel medio del mar para la definición de la línea de costa de acuerdo con la regla de Bruun. (Davidson-Arnott, 2005).

Los perfiles de playa son una herramienta que permiten observar y analizar el estado y los cambios de las playas, además de su importancia en la restauración y recuperación de éstas. Según Scott, Masselink & Russell, (2011) los procesos de transporte, acumulación y erosión, son los responsables de la forma del perfil, y estos a su vez, aportan información para el estudio de la dinámica de las costas. En la Figura 2-1, se aprecian las diferentes zonas en las que se puede dividir el perfil de playas.

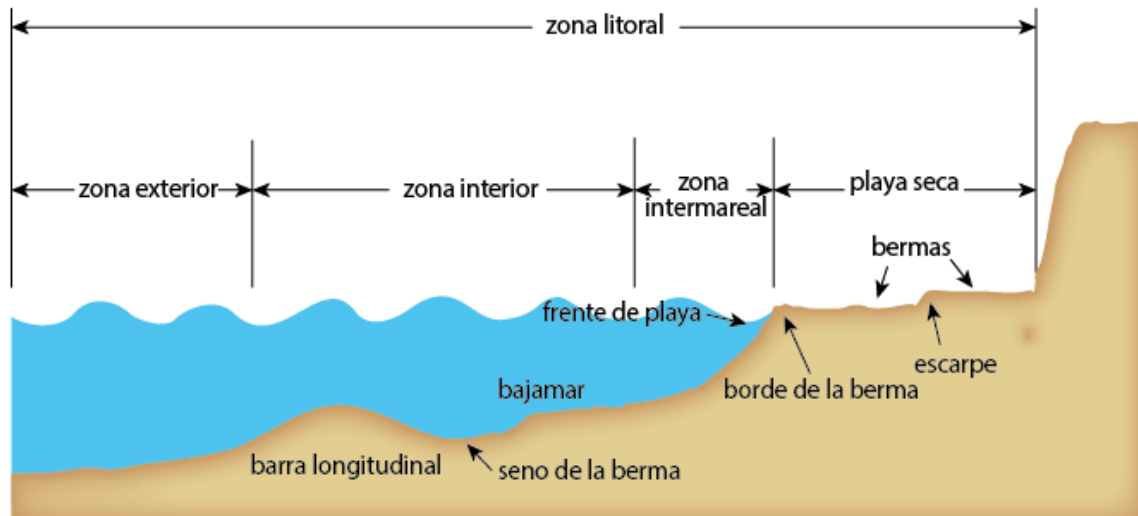


Figura 2-1. Zonificación y elementos del perfil de playa. Adaptado de (Morang & Parson, 2008)

2.1.2 Variación del Perfil

El perfil de la playa varía según se modifique la intensidad y patrón de transporte transversal y en menor medida, por los cambios en el transporte longitudinal de sedimentos como resultado de la dinámica marina especialmente debido al oleaje. Los cambios morfológicos más notables son los asociados a los desplazamientos de las barras y al avance o retroceso de la berma. Ello genera toda una tipología de formas de playa.

Un modelo que ha sido ampliamente aceptado para la clasificación de playas es el propuesto por Wright & Short (1984). Luego Masselink & Short (1993) propusieron una modificación a fin de incluir los efectos de la marea y el tamaño del sedimento en el tipo de morfología de una playa. Para ello utilizaron el parámetro propuesto por Dean (Ω) Dean, (1991) que relaciona la altura de ola (H) entre la velocidad de decantación de sedimento (w) y el periodo de la ola (T), tal como se describe en la Ecuación 2-1 y la carrera de Marea Relativa en la Ecuación 2-2, donde CM representa la carrera de marea.

$$\Omega = \frac{H}{w \cdot T} \quad 2-1$$

$$CMR = \frac{CM}{H} \quad 2-2$$

La rotura del oleaje también se tiene en cuenta para la clasificación morfodinámica de la playa. Según la GIOC, (2000) el tipo de rotura de oleaje depende del peralte del oleaje y la pendiente del fondo, siendo el Número de Iribarren (I_r), el parámetro

aceptado como controlador del tipo de rotura. En la Ecuación 2-3 se presenta la relación de la pendiente del fondo con el peralte de ola

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad 2-3$$

Además, se utiliza el parámetro de escala de rompiente, ε , definido en la Ecuación 2-4, donde a_b y w son la amplitud y frecuencia angular del oleaje incidente y g es la aceleración de la gravedad.

$$\varepsilon = \frac{a_b \omega^2}{g \tan^2 \beta} \quad 2-4$$

Existen dos estados morfodinámicos extremos que permiten estudiar las playas en dos dimensiones (en perfil), estos son el perfil disipativo y el reflejante.

2.1.2.1 Perfil Disipativo

Presentan un $\Omega > 6$, además es equivalente al perfil de invierno con una pendiente suave $0.01 \leq \tan \beta \leq 0.02$ (homogeneidad longitudinal). Estas playas se presentan con valores continuados de ε superiores a 20 ($I_r < 0.4$), lo que implica roturas en descrestamiento y una disipación de la energía de oleaje progresiva a lo largo del perfil (ver Figura 2-2). Es característico de arena fina y niveles de energía elevados, no existen bermas que delimiten la zona de playa seca, por lo que el perfil cóncavo se inicia prácticamente en el pie de duna o en el acantilado en su caso. (GIOC., 2000).

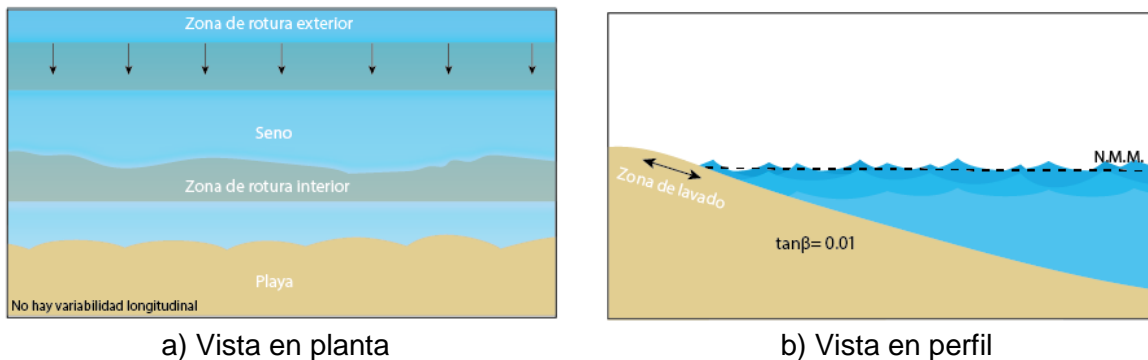


Figura 2-2. Estado de playa disipativa. Modelo de Wright y Short (1984).

2.1.2.2 Playas Intermedias

Con un $1 < \Omega < 6$, entre los perfiles disipativos y reflejantes, se presenta toda una gama de estados intermedios. No se puede definir mediante un solo perfil dado que

poseen elementos de ambos tipos (disipativo y reflejante). También presentan morfologías muy complejas pues son básicamente tridimensionales y la morfología está fuertemente relacionada con los sistemas circulatorios que se establecen en las playas. Por lo general, las playas intermedias presentan diferentes estados en función de las condiciones del oleaje, la variabilidad total de estas es muy elevada.

▪ **Estado de playa con barra y surco longitudinal (LBT)**

El frente de playa adquiere más pendiente y ocasiona que la playa se vuelva más reflejante. Esto provoca un cambio en el tipo de rotura, que pasa a ser de tipo oscilación o colapso. En este tipo de estado de playa y como se evidencia en la Figura 2-3 resulta común la presencia de *cusps* (Ondulaciones rítmicas en el frente de playa debidas al oleaje, con dimensiones del orden de decenas de metros a metros)

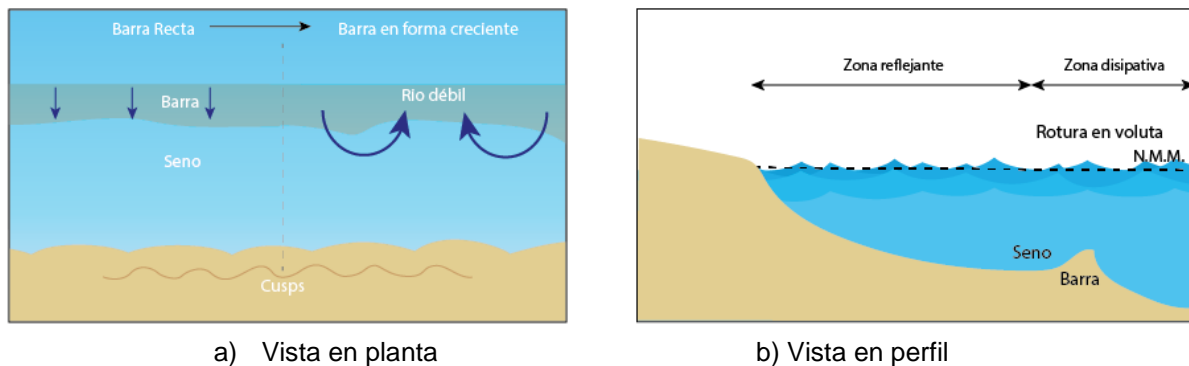
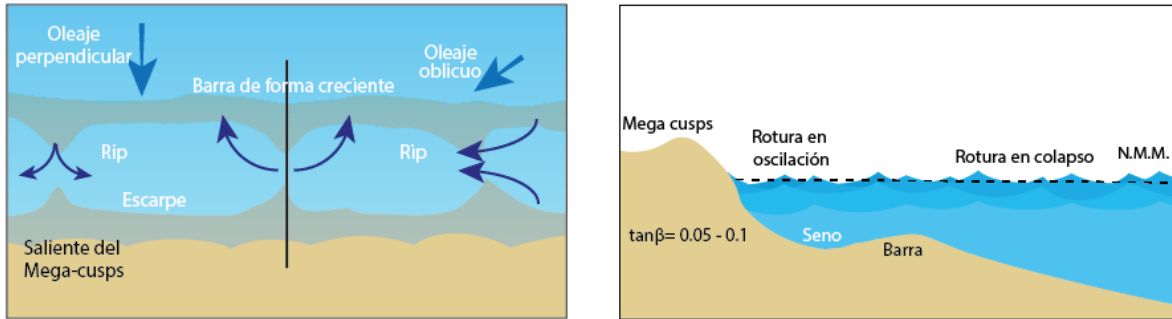


Figura 2-3. Estado de playa con barra longitudinal. Modelo de Wright y Short (1984)

▪ **Estado de Playa con Barra Rítmica (LBB)**

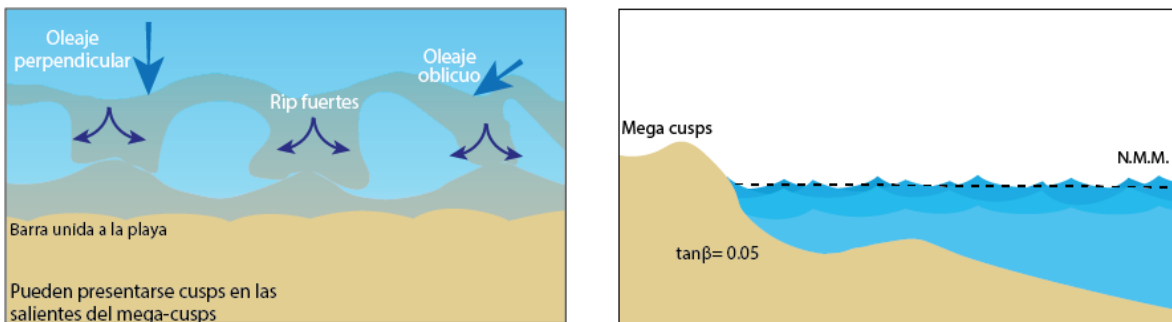
Este estado es de acreción, que se caracteriza por ondulaciones más o menos periódicas en el espacio. Son formas aconchadas con sus lados cóncavos opuestos entre sí en la cara interior de la barra como en el frente de playa. A estas formaciones se les nombra “*crescentic bars* o barras crecientes.” En este estado comienzan a ser evidentes las corrientes de retorno que aún son de pequeña magnitud, y permiten la aparición de celdas y sistemas circulatorios rítmicos a lo largo de la playa y entre la barra. Ver Figura 2-4.



a) Vista en planta
b) Vista en perfil
Figura 2-4. Estado de playa y barras rítmicas. Modelo de Wright y Short (1984).

▪ Estado de playa con barras transversales y retorno (TBR)

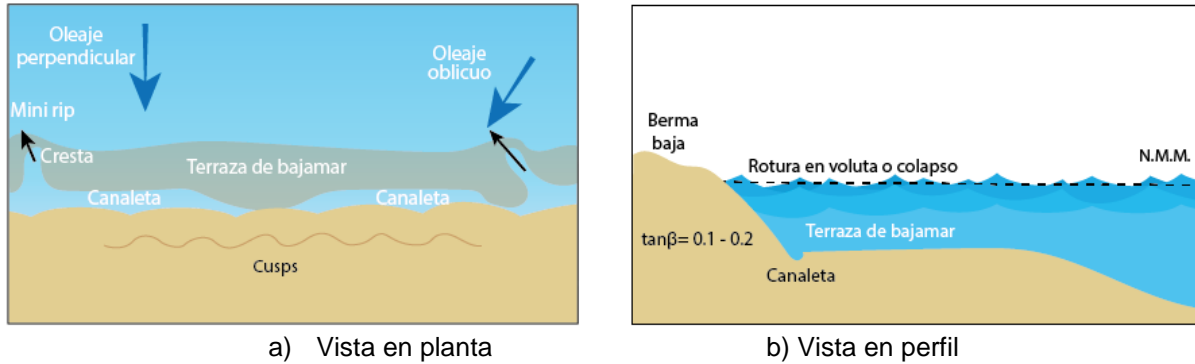
Estado de acreción que aparece cuando el desarrollo transversal de las barras y el frente de playa llega al extremo, a tal punto que los salientes opuestos llegan a unirse, produciendo barras transversales de perfil disipativo, alternado con zonas más profundas y de perfil más reflejante por donde se canalizan intensas corrientes de retorno, que es el elemento más característico de este estado de playa por su intensidad y su persistencia en módulo y dirección. Ver Figura 2-5.



a) Vista en planta
b) Vista en perfil
Figura 2-5. Estado de playa con barras transversales. Modelo de Wright y Short (1984).

▪ Estado de playa con terraza de bajamar (LTT)

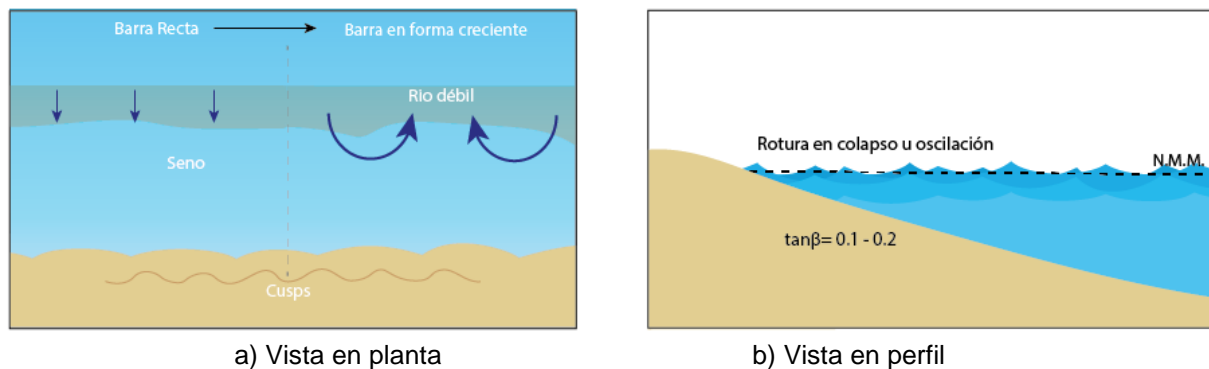
En este estado de playa, la migración de la barra se da hacia tierra sin elementos que la distingan en muchos tramos con el propio frente de playa y dejando un pequeño socavón. En la Figura 2-6 se puede apreciar la presencia de débiles corrientes de retorno en determinados puntos.



a) Vista en planta
b) Vista en perfil
Figura 2-6. Estado de playa con terraza de bajamar. Modelo de Wright y Short (1984).

2.1.2.3 Perfil Reflejante

Se presenta en playas de arenas medias a gruesas, con niveles de energía bajos, y valores de $\Omega < 1$. A diferencia del otro extremo de perfil (disipativo), el borde de la berma marca claramente el inicio del frente de playa. Las roturas se producen en colapso o en oscilación, sobre el frente de playa, que tiene pendiente elevada, $\tan\beta = 0.10 - 0.15$, con valores bajos del parámetro de escala de rompientes, medido sobre el frente de playa $\epsilon < 1.4$ ($L_{rb} > 1.5$), asociado a roturas en colapso u oscilación. Ver Figura 2-7.



a) Vista en planta
b) Vista en perfil
Figura 2-7. Playa reflejante. Modelo de Wright y Short (1984).

2.1.3 Profundidad de cierre

La morfología de una playa depende de la interacción de los procesos dinámicos que actúan sobre ella, sin embargo, los cambios sustanciales que se pueden dar en ella son relevantes hasta una cierta profundidad. Dicha profundidad es conocida como la profundidad de cierre y se caracteriza por la reducción drástica del movimiento de los sedimentos que derivan, delimitando así, una morfología del fondo marino costa afuera poco cambiante.

La profundidad de cierre se define como el lugar geométrico dentro del perfil transversal de una playa a partir del cual el movimiento de sedimentos está limitado. Este hecho deriva en que los principales procesos de pequeña escala espacio-temporal de la dinámica litoral van a estar enmarcados entre la línea de costa y dicha profundidad.

Existe la probabilidad de algún tipo de movimiento de sedimentos detrás del perfil activo de la playa, pero la magnitud de las fluctuaciones estacionales es muy pequeña y por lo tanto se considera despreciable. Analizando datos de levantamientos topo-batimétricos en diferentes playas para condiciones de oleaje, tamaño de sedimentos y pendientes de playas muy diversas Hallermeier (1978) asumió que la profundidad de cierre se relaciona con la suspensión energética de sedimentos y a partir de la cual se consideran despreciables los cambios del perfil de playa. (Ver Ecuación 2-5).

$$h = 2.28H_{s12} - 68,5 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad 2-5$$

H_{s12} representa la altura de ola significativa que es excedida doce horas al año, T_s es periodo pico asociado. Birkemeier (1985) sugirió diferentes valores para las constantes de la Ecuación 2-5 y encontró la relación en la Ecuación 2-6.

$$h = 1,75H_{s12} - 57,9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad 2-6$$

Ambas formulaciones son aparentemente muy similares, pero esconden importantes diferencias conceptuales ya que Hallermeier (1978) tiene un carácter anual mientras que Birkemeier (1985) está basada en mediciones realizadas durante periodos concretos.

2.1.4 Evolución del perfil de playa

El monitoreo de los perfiles de playa constituye una de las herramientas más eficaces para el estudio de las variaciones morfológicas, pues a través de estos se pueden determinar los estados por los que transita y los procesos involucrados en dichas transformaciones. Por lo anterior, son necesarios modelos de evolución de perfil que simulen la realidad y/o permitan el establecimiento de escenarios predictivos acerca del comportamiento de esta zona de la playa, principalmente por cambios en el transporte transversal de sedimento. Las variaciones en el transporte

longitudinal de sedimento no se tienen en cuenta, en este caso se analiza un perfil a lo largo de la costa para cada instante de tiempo. Los cambios morfológicos sufridos por un tramo de costa son el resultado integrado de la acción de diferentes agentes dinámicos actuando a diferentes escalas espaciales y temporales.

La variabilidad es sin duda, el rasgo más característico de una playa debido a que estas no se mantienen fijas en una posición, sino que cambian su perfil constantemente, y su configuración planta a lo largo del espacio y el tiempo.

2.1.4.1 Escalas de tiempo

Se parte de que todos los cambios deben ser referenciados a una escala de tiempo. Las playas pueden tener una tendencia general a crecer o a erosionarse al establecerse un perfil de equilibrio. Se habla entonces de cambios a largo plazo (crecimiento de pendiente de la playa), cambios a corto plazo (erosión de la playa por tormentas), y cambios temporales referidos la condición de un equilibrio dinámico, propios de una playa estable.

- **Cambios a largo plazo**

Son escalas temporales con variaciones del orden de décadas, la costa experimenta modificaciones de forma global, tanto en planta como en perfil, asociadas a modificaciones en la capacidad del transporte de sedimentos en muchos casos debido a la construcción e implantación de obras de protección, tales como; rompeolas, diques sumergidos, malecón de retención

Por su parte los ríos juegan un papel fundamental como fuente de sedimento al igual que las variaciones relativas en el nivel del mar, de acuerdo a Bruun (1962), citado por Cooper & Pilkey, (2004). De igual forma según Karunarathna et al., (2012) los intercambios de sedimento se presentan entre el perfil activo de la playa y la parte más interna de la plataforma costera como consecuencia de movimientos ondulatorios provocados por el oleaje y las corrientes de retorno una vez es disipada la energía. La escala temporal asociada a esta componente es del orden de décadas o superior.

- **. Cambios a medio plazo**

Esta variación la realiza el sistema litoral de forma sistemática, considerada como una escala espacial del orden de kilómetros y a una escala temporal de varios años. (GIOC., 2000). En los cambios de mediano plazo, el principal agente impulsor es el oleaje debido a su capacidad para generar un transporte longitudinal de sedimentos, y más específicamente, las variaciones de este a lo largo de la costa.

Las escalas de mediano plazo son del orden de 1 a 10 años, tales como los ciclos de mareas, las tormentas, los ciclos de inundación y variaciones temporales; Wolman & Miller, (1960) llamaron esta escala como eventual, la cual tiene mucha importancia por los eventos con un alto contenido energético que se presentan y representan una perturbación para la morfología de la costa, haciendo que este tipo de eventos excedan los umbrales que pueden lograr los eventos de una regularidad constante.

- **Cambios a corto plazo**

Se consideran como las variaciones que experimenta la zona más activa del perfil de la playa (zona de rompientes) como resultado de eventos meteorológicos extremos, pues durante su acción se manifiestan retrocesos más significativos que en avances de la línea de costa, así como en las modificaciones del sistema surco/barra. Según Karunarathna et al., (2012) los principales agentes de cambio son el oleaje y el viento, su acción se presenta de forma estacional y/o cíclica (se sustituyen períodos de oleaje de baja energía y de tormentas). Lippmann & Holman, (1990) y Leont'yev, (2012) definen que la escala temporal de estos cambios es inferior a un año, pudiendo llegar a producirse variaciones en el orden de horas.

Bertoni & Sarti, (2011) estudiaron la evolución de perfiles de playas artificiales de grano grueso luego de una serie de tormentas, donde encontraron que el transporte longitudinal y transversal a la costa es capaz de desplazar los sedimentos de grano grueso y que las dos formas de transporte en conjunta reorganizan los perfiles de playa. Los oleajes más fuertes (mayor altura y periodo) contribuyen en un gran porcentaje a generar la dinámica sedimentaria litoral. Así mismo describen que la fuerte interrupción del transporte litoral e impactos erosivos de gran magnitud en posteriores secciones de playas se da debido a la formación de salientes o hemitómbolo de grandes dimensiones.

2.1.5 Escalas espaciales

Los proyectos de regeneración de playas se basan principalmente en el conocimiento de la interacción de la dinámica marina y los sedimentos. Este conocimiento, todavía incompleto, se plasma en una serie de modelos altamente empíricos de planta perfil y transporte de sedimentos que facilitan predicciones sobre las geometrías media y extremas de la playa y su evolución a mediano y largo plazo.

El oleaje, las corrientes, las variaciones del nivel medio, entre otras, son dinámicas actuantes sobre la playa que movilizan los sedimentos y modifican la forma tanto en planta y perfil, estos cambios de forma son clasificables en determinadas escalas de espacio y tiempo.

2.1.5.1 Cambios en perfil

Los cambios en el perfil de playa son aquellas modificaciones que se producen en la dirección normal a la costa, producto generalmente del transporte transversal de sedimento. En principio, suelen considerarse como estacionales y/o cíclicos, ya que dependen fundamentalmente del contenido energético del oleaje, el cual suele tener un marcado carácter estacional.

- **Perfil de erosión o de tormentas**

Como lo indica su nombre se produce durante la acción de tormentas, donde el oleaje que actúa sobre la playa es de gran contenido energético y, genera durante el proceso de rotura corrientes de resaca *-undertow-* de gran intensidad, originando grave erosión en la parte interna del perfil, retroceso de la línea de costa y transporte de material mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas. El resultado final es una disminución de la pendiente del perfil. Cabe resaltar que las barras suelen cumplir dos funciones, actúan como *filtro energético* haciendo que las olas rompan antes de llegar a la playa y actuando, por lo tanto, como un mecanismo autoprotector ante la acción de las tormentas. A la vez, las barras actúan a modo de *reservorio sedimentario*, donde el sedimento es almacenado hasta que las condiciones de oleaje permitan su regreso a la playa emergida. Ver Figura 2-8.

- **Perfil de acreción**

También llamado reconstructor se produce durante la acción de un oleaje de bajo contenido energético, generalmente asociado a un oleaje tipo *swell*; bajo estas condiciones, el sedimento erosionado y depositado como barra, comienza a ser transportado hacia la playa seca hasta llegar a la línea de costa produciendo un avance de esta. El resultado final, es un perfil sin barras, de elevada pendiente y con una amplia berma. Ver Figura 2-8

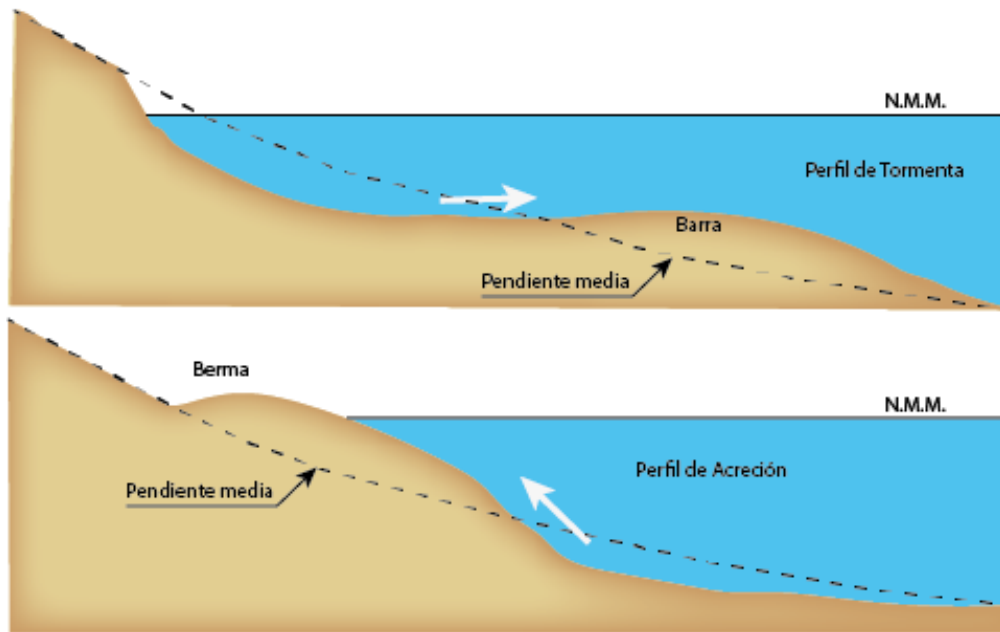


Figura 2-8. Perfil de erosión y acreción de playas. Adaptado de (Van Rijn, 1998)

2.1.6 Perfil transversal de equilibrio

Como se ha comentado anteriormente, desde hace varias décadas se construyen modelos matemáticos que buscan realizar predicciones confiables de la evolución de las playas, determinar las consecuencias de las tormentas y la elevación del nivel del mar. Aparte, esos modelos permiten con apropiados datos iniciales de oleaje y batimetría, simular el comportamiento de la línea de costa y del relieve del fondo marino en un periodo dado. Como es el caso de este estudio, pueden ser utilizados para el diseño de estructuras costeras y/o vertimiento de arena, como evaluadores de su efectividad y funcionalidad en un período de tiempo determinado.

Con el fin de idealizar el concepto de perfil transversal de equilibrio de una playa, existen unas características generales a nivel cualitativo que Dean (1991) resume en:

- Tienden hacer cóncavos
- La evolución de la altura de ola en la zona de rotura es lineal
- No existen variaciones de largo plazo del nivel medio del mar
- La pendiente es más suave cuanto más fino es el sedimento de la playa.
- La profundidad (h) es una función de la distancia horizontal (x), en términos de una constante (A) y un exponente (m).

Según los aportes de Dean (1991) el perfil de equilibrio es el resultado de un balance que se establece entre las fuerzas que llevan el sedimento hacia el mar (destructivas) y las que lo transportan hacia la costa (constructivas). Es decir, que el establecimiento del equilibrio significa que la razón de disipación de energía en el fondo es constante a lo largo del perfil.

Se puede considerar que entre las fuerzas destructivas más importantes se hallan: la gravedad y las fluctuaciones del oleaje que permiten el desarrollo de altos frentes turbulentos en la zona de rompiente. En cuanto a las fuerzas constructivas se pueden citar: las fuerzas de rozamiento en el fondo que actúan en dirección a la costa; la velocidad de la corriente de fondo (disipación de energía); la suspensión intermitente y el transporte selectivo de sedimento bajo la cresta de la ola hacia la costa.

En la literatura se presentan diversos ajustes de curvas realizados con datos batimétricos de la playa basados en la hipótesis de disipación de energía. Tal como Bruun (1954) que ajustó una batimetría de la costa oeste de Dinamarca; un estudio más profundo y con mayor detalle fue realizado por Dean (1991) a lo largo de la costa del Golfo de México sobre 500 perfiles. El perfil de equilibrio es un promedio estadístico de las variaciones del perfil de la playa en un tiempo determinado. Este puede ser determinado mediante:

$$h = Ax^m \quad 2-7$$

Bruun, (1954) consideró una disipación de energía constante por unidad de área y derivó un exponente "m" de 0.67, en cambio Dean (1991) examinó la disipación de energía en términos de volumen de agua e indicó un valor del exponente m de 0.4. En cuanto al factor de forma A, en la Tabla 2-1 se aprecian las expresiones más empleadas. Donde w representa la velocidad de caída en m/s.

Tabla 2-1. Expresiones para estimar el factor de forma A

Autor	Expresión	Limite D_{50} (mm)
Moore (1982)	$A = 0.51w^{0.44}$	-
Bowen (1980)	$A = w^{2/3}$	-
Kriebel (1991)	$A = 1.05w^{0.44}$	-
Hanson y Kraus (1989)a	$A = 0.41D_{50}^{0.94}$	$D_{50} < 0.4$
Hanson y Kraus (1989)b	$A = 0.23D_{50}^{0.32}$	$0.4 < D_{50} < 10$
Hanson y Kraus (1989)c	$A = 0.23D_{50}^{0.28}$	$10 < D_{50} < 40$
Hanson y Kraus (1989)d	$A = 0.46D_{50}^{0.11}$	$400 < D_{50}$

Fuente; Propia de Investigación

2.1.7 Transporte de sedimentos

El sedimento se mueve en el espacio y el tiempo de forma continua debido a las corrientes marítimas. Dichas corrientes pueden ser inducidas por oleaje, mareas, vientos o gradientes de temperatura, entre otros. Esta investigación, centrará el estudio en el movimiento generado por rotura de oleaje, por ser el más importante en el transporte de sedimentos y, por lo tanto, en la respuesta morfodinámica de las playas. Los modos de transporte se pueden agrupar en transporte de fondo (salto, rodadura o arrastre) o transporte en suspensión, por lo general, el más importante.

2.1.7.1 Transporte transversal de sedimentos

Es el volumen de sedimentos que se transporta en la dirección perpendicular a la costa por unidad de tiempo. Por tanto, es el principal responsable de los cambios en el perfil. Debido a que la morfología del perfil varía normalmente de invierno a verano como se mencionó anteriormente, por lo tanto, la escala temporal del transporte transversal de sedimentos es de meses o estaciones, a diferencia del transporte longitudinal que está dado a una escala de largo plazo.

El transporte transversal es muy importante debido a que el perfil de playa es formado por erosión-acreción asociado al transporte normal a la costa, además el modelado de corrientes longitudinales generadas por oleaje y transporte sedimentario paralelo a la costa requiere como entrada la forma del perfil de playa.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE LA EVOLUCIÓN DEL PERFIL DE UNA PLAYAS

Los procesos físicos que se involucran en la modelación de la morfodinámica de playas son complejos debido a la gran variedad de escalas, por lo que describirlos en términos matemáticos representaría una limitante en el estado del conocimiento. Otra de las dificultades para tener en cuenta en el estudio de las playas es la tridimensionalidad de los procesos involucrados. Por tales razones en la actualidad no existe un único modelo que pueda ser aplicado en todo el rango de escalas y ser utilizado para estudiar cualquier problema en el litoral costero.

En consecuencia, últimamente han surgido y planteado diferentes tipos de modelos numéricos que varían desde modelos sofisticados en 3D hasta más simples en 1D, destinados a determinar y predecir las modificaciones que la dinámica marina producirá en la playa. Estos cambios al igual dependerán tanto de las condiciones del clima marítimo (oleaje, mareas, viento, precipitación, etc.) como de las características de la arena de la playa (tamaño, distribución granulométrica y espacial del sedimento, densidad y composición de los granos, etc.).

Existen infinidad de modelos de evolución de playas de muy diversas características y alcance. Los modelos tienen un campo de acción particular que permite clasificarlos según diversas tipologías tales como: modelos numéricos o teóricos (en función del método de resolución), modelos de perfil o de planta (según la dirección espacial que analizan), modelos de corto, medio o largo plazo según la escala temporal. (Ver Figura 2-9).

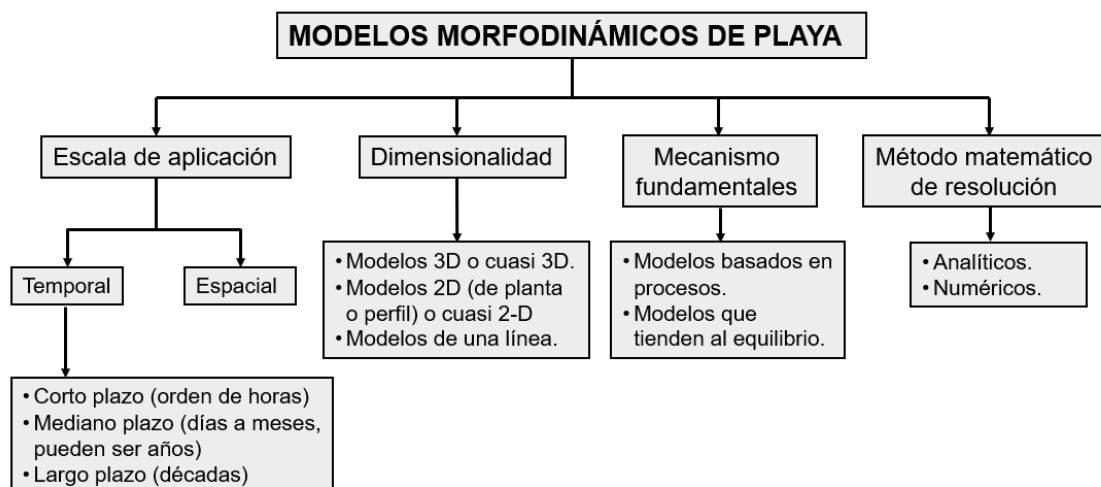


Figura 2-9. Clasificación de modelos de evolución de morfología de playas.

2.2.1 Modelos de evolución en el corto plazo

En esta clasificación se diferencian los modelos de evolución de perfil y modelos de evolución en 3D.

2.2.1.1 Modelos de Evolución de Perfil

Estos tipos de modelos tienen como objetivo predecir el comportamiento de un perfil de playa en escalas temporales cortas (tormentas, días). Cabe aclarar que actualmente no son apropiados para predicciones en escalas temporales mayores ya que se desestabilizan y generan soluciones físicamente imposibles. Estos modelos simulan la evolución del perfil de playa causada principalmente por el transporte transversal de sedimento ya que las variaciones en el transporte longitudinal de sedimento son analizadas por modelos en planta. Así que únicamente se analiza un perfil a lo largo de la costa para cada instante de tiempo.

Los modelos numéricos de evolución de perfil también se pueden clasificar y diferenciar en dos grandes grupos: los modelos de bucle abierto, que basándose en modelos hidrodinámicos y formulaciones de transporte de sedimentos pretenden llegar a la esencia de los fenómenos físicos con el objetivo de determinar las variaciones morfológicas del perfil de playa, sin incluir una tendencia al equilibrio. A diferencia de los de bucle abierto, los modelos de bucle cerrado son basados en una formulación de equilibrio, conocida también como la hipótesis de disipación de Dean (Dean, 1977).

Algunos modelos de bucle cerrado son:

- EDUNE
- SBEACH
- CROSS
- PEQUE

Los modelos de bucle cerrado pueden determinar la erosión producida en la playa por efectos de una tormenta y su posterior recuperación en períodos de calma (Larson, 1988). Además, permite el cálculo de la evolución del perfil una vez vertida la arena y sometida a la acción del oleaje.

Dentro de los modelos de bucle abierto están:

- UNIBEST-TC
- LITCROSS
- PETRA 2.0
- XBEACH

A continuación, se presenta las principales características y procesos físicos que desarrollan, destacándose fortalezas y debilidades (limitaciones) de diferentes modelos de evolución morfodinámica de playas con el fin de argumentar la elección del modelo seleccionado para el desarrollo de la presente investigación

▪ **Modelo SBEACH**

El SBEACH, (Simulating Storm - Induced Beach Change) desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers es un modelo matemático con fundamento geomorfológico para la simulación de las variaciones de perfil de playa como consecuencia de los efectos de ondas largas (Randall et al., 1996). El modelo Sbeach calcula los cambios de perfil de playa con énfasis en la erosión de playas y dunas, además de la formación y movimiento de barras. Para el modelo los agentes que generan el transporte de sedimentos y cambios en el perfil de la costa son la rotura del oleaje y los cambios en el nivel del mar, este último es calculado a partir de olas de tormenta, de las mareas y de los vientos (Larson & Larson, 1989)

- Limitaciones

Entre las principales limitaciones que presenta el modelo se encuentran: a) no está diseñado para examinar cambios de perfil con cercanías a diques (espolones, muelles) y estructuras similares que formen barras a causa del transporte de arena a lo largo de la costa; en tal caso, el fuerte cambio del perfil puede ser controlado más por la interrupción del transporte a lo largo de la costa que por procesos que se dan a través de la costa; b) el modelo no analiza el transporte de sedimentos a lo largo de la costa en una escala del largo plazo debido a que presentan factores diferentes en la fuerza hidrodinámica para la rotura del oleaje con los cambios del nivel del agua.

▪ **Modelo EDUNE**

EDUNE (Dune Erosion Model), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers y la Federal Emergency Management Agency, es un modelo numérico para predecir la erosión de dunas basado en la teoría de perfil de equilibrio desarrollada por Dean, (1977) donde los perfiles de playa individuales deben entrar en equilibrio estático con olas y niveles de agua constante. Es considerado como el primer modelo cuantitativo desarrollado para predecir el transporte de sedimentos en perfil.

Módulo de transporte de sedimento. para el cálculo del transporte de sedimento el modelo utiliza la teoría del perfil de equilibrio de Dean (1991) el cual establece un equilibrio de la disipación de energía por unidad de volumen para cada perfil, en función de la forma de perfil, la altura de la ola, y el nivel del agua

▪ **Modelo PETRA**

El modelo Petra está basado en la simulación de los procesos físicos (bucle abierto) que afectan al perfil de playa, propagación del oleaje, corrientes de retorno, transporte de sedimentos y variación de la batimetría. El modelo numérico resuelve las ecuaciones del flujo de sedimentos dentro de la zona de rompientes al igual que los cambios en la batimetría debido al transporte de sedimentos para un perfil de playa (GIOC., 2001a).

Para un mayor entendimiento las ecuaciones de gobierno que resuelve el modelo, este fue clasificado en módulos.

Módulo de hidrodinámica. El modelo utiliza formulaciones promediadas en la fase para determinar el campo de oleaje, usando la ecuación de la energía espectral. Además, de las variaciones del tensor de radiación y consecuentemente la alteración del nivel medio a través de la teoría lineal. (GIOC., 2001a)

Módulo de Transporte. Según GIOC (2001a) la batimetría del perfil, las características del sedimento y las condiciones del oleaje permiten calcular la distribución del transporte de sedimentos a lo largo del perfil. El modelo Petra en la zona swash utiliza la formulación de Wise et al. (1996)

- Limitaciones

La principal limitación de los modelos Edune y Petra no son apropiados para análisis en escalas de tiempo superiores a algunos días, pues se desestabilizan y generan soluciones irreales. Adicionalmente, estos modelos están basados en una formulación de equilibrio, despreciando las variaciones en el transporte longitudinal.

2.2.1.2 Modelos de evolución en 3D

Los modelos de evolución tridimensionales permiten determinar la hidrodinámica y los cambios morfológicos en un dominio en 3D. En la actualidad estos modelos son usados para calcular cambios en la topografía local a nivel espacial y a un corto plazo en el temporal ya que es imposible aplicarlo en el largo plazo debido a su alto costo computacional y aun es cuestionable su validez (se desestabilizan y generan soluciones físicamente imposibles) debido al nivel de detalle que se debe emplear para la modelación a corto plazo. Por tanto, es necesario un gran número de parámetros de entrada al modelo e imprescindible una extensa verificación y análisis de sensibilidad previo.

Los modelos Quasi-3D son una variedad de modelos de evolución de perfil (Roelvink et al., 1994); en estas variaciones se articula un modelo vertical de dos dimensiones (2DV) para calcular los perfiles de velocidad con un modelo que

determina la circulación costera, el transporte de sedimentos y los respectivos cambios de la batimetría como lo es el modelo horizontal de dos dimensiones (2DH o modelo de área costera). Debido a que este tipo de modelo requiere un alto tiempo computacional y datos suficientes para su validación no es recomendado para las predicciones de largo plazo.

Los modelos 2-DH resuelven las ecuaciones del movimiento y de continuidad integradas en vertical en una malla, obteniendo como resultado los niveles y las componentes horizontales de la velocidad. Una de sus limitaciones es que llegan a perder la estructura vertical del flujo. Toda la estructura vertical del flujo queda embebida en la expresión de la fricción en el fondo. Ejemplos de modelos 2DH

- COPLA
- LITPACK
- 3D-SHORE
- TELEMAC
- MOPLA 2.0

- **Modelo COPLA**

El modelo COPLA (COrrientes en PLAyas), es un modelo 2-DH desarrollado por (GIOCI, 1994) el cual deduce de las ecuaciones de Navier Stokes. Se integran estas ecuaciones en la profundidad y se promedian en un período de tiempo (en la escala del oleaje) en un sistema de ejes cartesianos localizados en el nivel medio del mar, donde *x* indica la dirección transversal a la playa, y la dirección longitudinal y *z* la profundidad (Losada et al., 1995).

Para diseño según Losada et al., (1995) el modelo COPLA constituye una herramienta importante que permite conocer y entender los procesos morfodinámicos que se presentan en una playa o tramo de costa.

2.2.2 Modelos de evolución en el largo plazo

También conocidos como modelos de una línea analizan la evolución en planta de las playas (de cientos de metros a kilómetros) y en el largo plazo (años a décadas). Últimamente se ha aumentado el uso de estos modelos debido a que permiten simplificar el problema real, requiriendo menor tiempo de cómputo para conseguir resultados. De esta categoría los modelos más comunes son los de una línea o de línea de costa (oneline o shoreline models).

Los modelos de una línea simulan la evolución de la playa debido a la modificación de la línea de costa. Este cambio se produce por las variaciones del transporte

longitudinal y el temporal de sedimento a lo largo de la costa. En este modelo se supone que el perfil de playa no cambia de forma, sólo se traslada paralelamente a sí mismo hasta la profundidad de cierre. La idea original de la teoría de una línea fue de Pelnard-Considère en 1956, acompañada de una serie de soluciones analíticas, que fueron los antecedentes de los diferentes modelos numéricos desarrollados con el avance de los computadores para simular la evolución de la línea de costa en un amplio rango de playas, estructuras costeras, características de oleaje y condiciones de contorno.

▪ **Modelo ONELINE**

Desarrollado en la Universidad de Queen (Canadá) el modelo de una línea tiene por objeto evaluar el transporte transversal de sedimentos teniendo en cuenta las condiciones de la costa. De acuerdo con Dabees & Kamphuis, (1998) el modelo de una línea es de los más simples que incluyen escalas espacio-temporales y permite estimar la evolución de una playa bajo la acción del oleaje incidente y cualquier forma inicial o tipo de estructura que tenga la playa. El modelo está dado por la siguiente relación (Ecuación 2-8).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{1}{d_c + B} \left(\frac{\partial SI}{\partial y} - q \right) \quad 2-8$$

Donde q representa la existencia de fuentes de sedimento y, SI es la tasa de transporte longitudinal, $\frac{\partial X}{\partial t}$ representa la variación de la línea de costa en el tiempo; d_c la profundidad de cierre también conocido como el límite de la zona activa de transporte longitudinal de sedimentos.

Dentro de las limitaciones del modelo se encuentra el hecho de no poder representar el efecto del transporte transversal de sedimento producido por tormentas, así como también el movimiento cíclico de la posición de la línea de costa debido a las variaciones estacionales del oleaje.

▪ **Modelo GENESIS**

El modelo GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change) permite predecir el cambio de la línea de costa en largo plazo en la escala temporal (1-100 meses) y en la espacial en términos de Kilómetros. Como se había mencionado anteriormente existen dos tipos de transporte de sedimentos según su dirección, como consecuencia de la acción del oleaje: transporte longitudinal, a lo largo de la línea de costa, y transporte transversal, perpendicular a ella. Según Hanson, (1989) para predicciones a largo plazo las variaciones del transporte longitudinal son las causantes del cambio de la línea de costa.

En esencia este modelo simula las variaciones espacio-temporales de la línea de costa debido a las diferencias en el transporte longitudinal. El modelo es propicio para el cálculo de los efectos de actividades antrópicas en la protección y recuperación de playas tales como espigones, diques exentos, aportaciones puntuales de sedimento (descargas fluviales). Al igual que el modelo oneline la hipótesis básica es que el perfil se traslada en la dirección perpendicular a la línea de costa paralelamente así mismo hasta la profundidad de cierre. (Ecuación 2-9).

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad 2-9$$

Donde y representa la posición de la línea de costa; D_c la profundidad de cierre también conocido como el límite de la zona activa de transporte longitudinal de sedimentos; Q el caudal de transporte longitudinal de sedimentos.

- Limitaciones de los Modelos de Evolución en el Largo Plazo

Aplicación en el medio plazo. Los modelos de una línea no tienen en cuenta la variación de la forma y extensión del perfil, convirtiéndolos en una herramienta no útil para el medio plazo, siendo incapaces de reproducir las variaciones estacionales de la línea de costa de invierno-verano, entre otros fenómenos. Por lo tanto, la aplicabilidad de estos modelos se limita al largo plazo.

Aplicación en zonas de refracción-difracción. La forma simplificada que utilizan los modelos de una línea para determinar el oleaje en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los importantes no es la adecuada debido a que asumen constante el perfil de playa, aunque es necesario tener en cuenta la variabilidad de la extensión y la forma del perfil con el fin analizarlo (la formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción se debe incluir).

2.3 DESCRIPCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO XBEACH

XBeach (Xtreme Beach behaviour), es un modelo numérico desarrollado por el Instituto Unesco-IHE para la Educación relativa al Agua, Deltares y la Universidad Tecnológica de Delft (Roelvink, et al.2010), para modelar las respuestas cerca de la costa bajo condiciones de tormenta y huracán. Este software de código abierto es un modelo 2D acoplado (hidrodinámico-morfológico), que utiliza un esquema explícito de diferencias finitas para resolver la ecuación de balance de acción de onda y la energía de los rodillos o rollers. El modelo se caracteriza por resolver la energía de onda corta dependiente del tiempo, el flujo y la propagación de las olas, el transporte de sedimentos y el cambio morfológico del nivel del lecho (Roelvink et al., 2009).

La funcionalidad de XBeach se divide entre varios módulos. En un único paso numérico, cada módulo se llama en una secuencia específica. XBeach comienza con el módulo de onda. En este módulo se calculan los gradientes de los tensores de radiación. El módulo de flujo utiliza el cambio en la tensión de radiación para calcular la elevación y las velocidades de la superficie. Esto conducirá al transporte de sedimentos y como paso final, se realiza la actualización morfológica de la batimetría y se obtiene una nueva batimetría de la región. El ciclo definido anteriormente continúa hasta el final de la simulación como puede verse en la Figura 2-10.

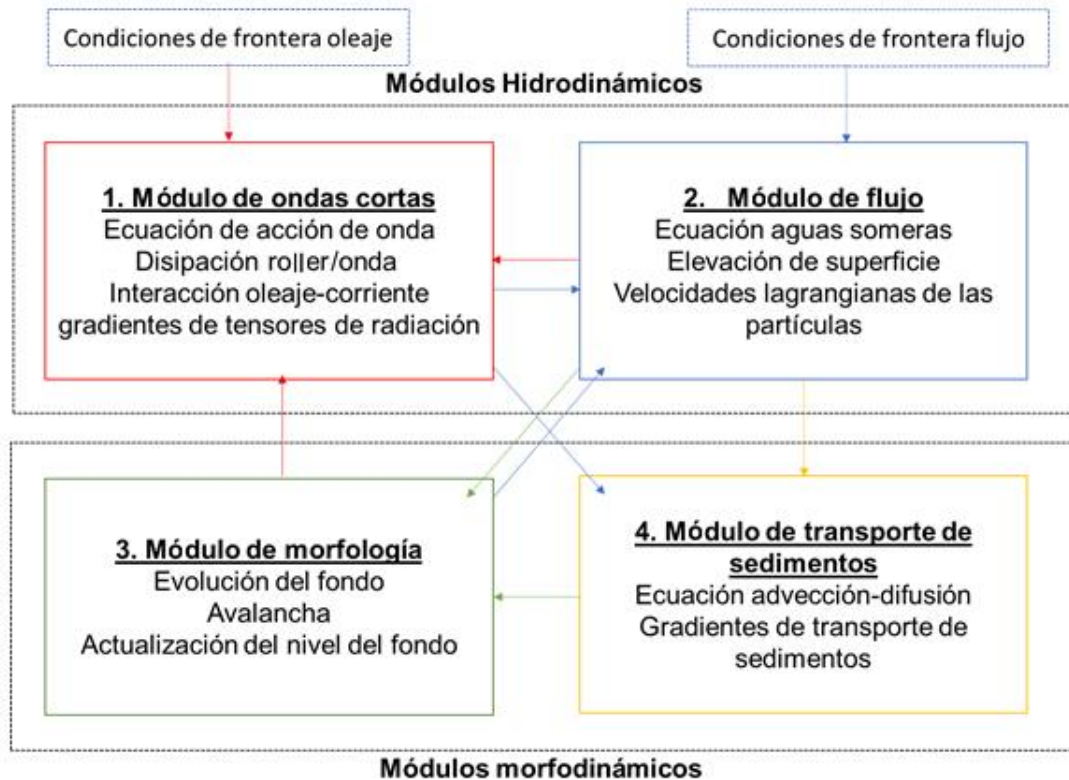


Figura 2-10. Estructura del modelo XBeach. Adaptado de Daly, (2009)

2.3.1 Sistema de coordenadas

XBeach utiliza un sistema de coordenadas donde el eje-x computacional siempre está orientado hacia la costa, aproximadamente perpendicular a la línea de costera; y el eje-y se está dispuesto de manera longitudinal (Figura 2-11). Este sistema de coordenadas está definido en coordenadas globales. El tamaño de la grilla en dirección x y puede variar, pero esta debe ser curvilínea. El modelo tiene un sistema de coordenadas locales que esté orientado respecto a un sistema de coordenadas globales (x_w , y_x) a través de un origen (x_{ori} , y_{ori}) y una orientación alfa. La orientación se define en sentido contrario a las manecillas del reloj.

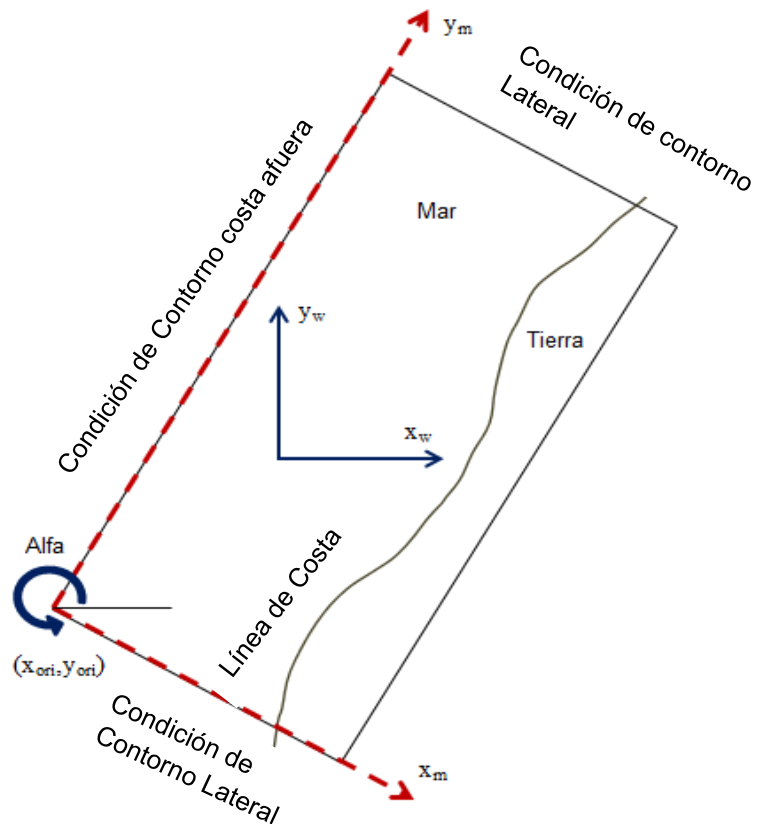


Figura 2-11. Sistema de coordenadas rectangular de XBeach. Adaptado de (Roelvink et al., 2015)

2.3.2 Definición de la grilla

La grilla aplicada en XBeach es escalonada, donde los niveles del fondo, de agua y concentraciones se definen en centros de celdas, y las velocidades y el transporte de sedimentos se definen en las caras de las celdas. En el balance de energía de la ola, del roller y el tensor de radiación se definen en el centro de las celdas, donde los gradientes del tensor de radiación se definen en los puntos u y v . (Ver Figura 2-12)

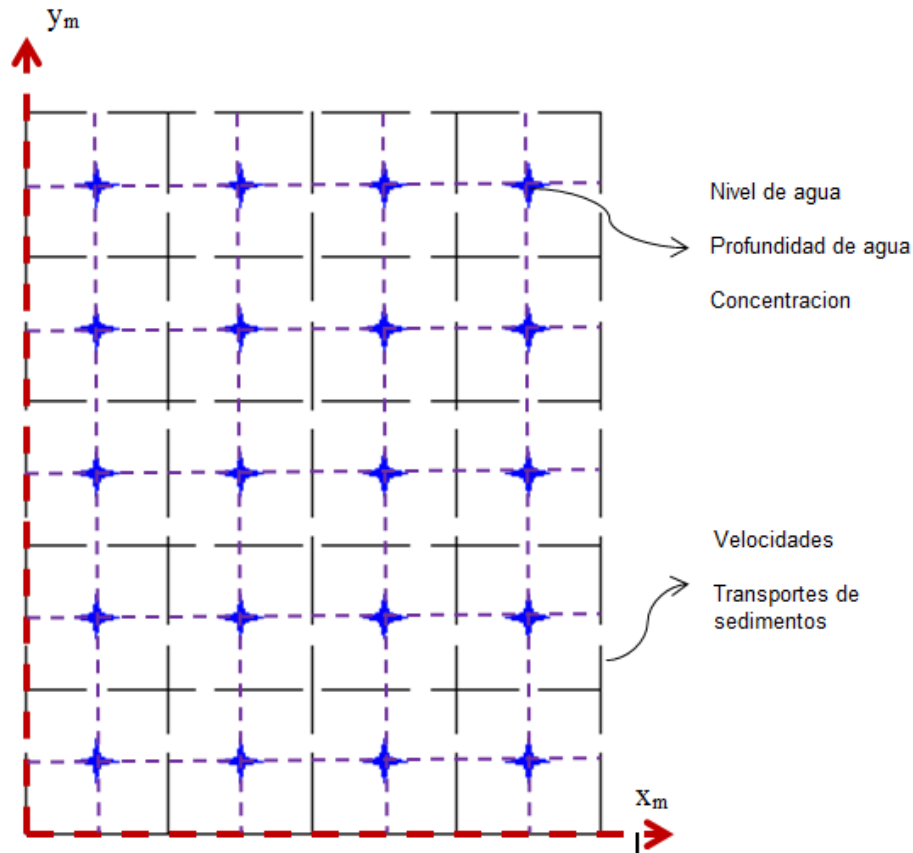


Figura 2-12. Definición de la grilla XBeach. Adaptado de Roelvink et al., (2015)

2.3.3 Opciones hidrodinámicas

XBeach fue desarrollado originalmente como un modelo que permite resolver las variaciones de olas cortas en la escala del grupo de olas y las olas largas asociadas a estos. Con el tiempo se han realizado modificaciones al modelo, permitiendo a los usuarios escoger en qué escalas de tiempo desean resolver;

- Modo estacionario
- Modo surfbeat
- Modo no-hidroestático

En la presente investigación solo se hará uso de las dos primeras opciones hidrodinámicas por lo tanto se omitió detallar el modo no hidroestático

- **Modo estacionario**

En el modo estacionario las variaciones del grupo de olas, y por consiguiente, todos los movimientos infragravitatorios son despreciados. Se utiliza principalmente para condiciones donde las olas incidentes son relativamente pequeñas y/o cortas, y estos movimientos infragravitatorios son diminutos. Las ecuaciones del modelo son similares a HISWA (Holthuijsen, 1989) pero no incluyen el crecimiento de la ola o las variaciones del periodo. Resuelve los procesos de propagación de onda, dispersión direccional, someramiento, refracción, disipación del fondo y rotura de la ola.

Una de las características a resaltar es que el principal flujo de retorno debido al flujo de masa se incluye en el modelo y afecta el transporte de sedimentos, direccionando hacia una contribución aguas adentro. Para balancear esto, los efectos generados por la forma no simétrica de la ola se incluyen. Los efectos de la pendiente de la playa pueden modificar el comportamiento de la sección de esta.

- **Modo surf beat (no-estacionario)**

Mediante esta opción se resuelven las variaciones de onda corta y las ondas largas asociadas en la escala del grupo de ondas. Las variaciones a través de los gradientes del tensor de radiación ejercen una fuerza sobre la columna de agua y producen olas de periodos más largos (olas infragravitatorias) y corrientes no estacionarias, las cuales son resueltas por las ecuaciones no lineales de aguas someras.

El modo surfbeat se utiliza cuando el enfoque está en los procesos que ocurren en la zona swash. Es totalmente válido en playas disipativas, donde las olas cortas son las que más se disipan cuando se aproximan a la línea de costa. En playas intermedias y durante eventos extremos los movimientos en la zona swash se dan de manera predominante en la banda infragravitatoria, como también el run-up (Roelvink et al., 2015).

2.3.4 Formulaciones y procesos del modelo

En esta sección del documento se hace una revisión de las formulaciones del modelo XBeach utilizadas para el desarrollo de la presente investigación.

2.3.4.1 Ecuación de balance de acción de onda

La incidencia del oleaje en la ecuación del momento de aguas someras se obtiene de una versión de la ecuación del balance de la acción de las olas que depende del tiempo. Esta función basada en el balance de energía varía en el espacio y tiempo y es una función de frecuencia absoluta y dirección.

$$E(\omega, \theta; x, y, t)$$

La ecuación de balance de acción está dada por;

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad 2-10$$

Donde A es la acción de la onda, un parámetro relevante para la propagación de olas en presencia de corrientes, calculada por;

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad 2-11$$

Donde θ representa el ángulo de incidencia con respecto al eje x, S_w la densidad de energía de onda en cada sector direccional, σ Frecuencia de onda, c_x La velocidad de propagación de la acción de la onda para la dirección x. c_y : La velocidad de propagación de la acción de la onda para la dirección y. c_θ : La velocidad de propagación de la acción de onda en el espacio θ .

Los términos de la derecha de la ecuación representan los términos de disipación y forman el sumidero de la ecuación. D_w disipación debido a la rotura del oleaje, D_f disipación debido a la fricción del fondo; D_v disipación debido a la vegetación. La velocidad de propagación de la onda en las direcciones x e y vienen dados por las Ecuaciones 2-12 y 2-13.

$$C_x(x, y, t, \theta) = C_g \cos \theta + u^L \quad 2-12$$

$$C_y(x, y, t, \theta) = C_g \sin \theta + v^L \quad 2-13$$

Con u^L y v^L las velocidades lagrangianas de la profundidad transversal y a lo largo de la costa respectivamente (se define más adelante), y la velocidad del grupo c_g obtenida a partir de la teoría lineal. Los últimos términos de las Ecuaciones 2-12 y 2-13 no se tienen en cuenta si la interacción onda-corriente está desactivada en XBeach. La velocidad de propagación en el espacio θ en la Ecuación 2-10 con el término c_θ , se obtiene utilizando la Ecuación 2-14.

$$C_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left[\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right] + \cos \theta \left[\cos \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \sin \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \sin \theta \left[\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} + \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad 2-14$$

Donde,

k: Número de onda

h: Profundidad total del agua

u: Velocidad transversal promedio en la profundidad

v: Velocidad promediada en profundidad a lo largo de la costa

θ : El ángulo de incidencia con respecto al eje x computacional.

Teniendo en cuenta la refracción por el fondo (primer término en el RHS) y refracción de la corriente (dos últimos términos en el RHS) y h representa la profundidad total del agua. El número de onda k es obtenido a partir de las ecuaciones eikoniales como se muestran en las Ecuaciones 2-152-152-16.

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad 2-15$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad 2-16$$

Donde k_x y k_y son las Componentes del vector de onda en la dirección x y y respectivamente y ω la frecuencia radial absoluta. El número de onda se obtiene entonces a partir de la Ecuación 2-17.

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad 2-17$$

La frecuencia absoluta está dada por la Ecuación 2-18;

$$\omega = \sigma + k_x u^L + k_y v^L \quad 2-18$$

Siendo σ es la frecuencia intrínseca y se obtiene a partir de la relación de dispersión lineal. En caso de desactivar la opción interacción onda-corriente, los dos últimos

términos de la Ecuación 2-18 no se tienen en cuenta, lo que significa que la frecuencia absoluta ω es igual a la frecuencia intrínseca.

La disipación total de la energía de las olas debido a la rotura de la ola se modela según Roelvink, (1993) por medio de la Ecuación 2-19.

$$\overline{D_w} = 2 \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \quad 2-19$$

Y

$$Q_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right) \quad \text{con} \quad H_{rms} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}}, \quad H_{max} = \frac{\gamma \tanh kd}{h} \quad 2-20$$

Donde $\overline{D_w}$ representa disipación total de energía de las olas debido a la rotura de olas según Roelvink, (1993) , E_w total de la energía, Q_b fracción de las ondas en roturas, H_{rms} Altura de onda cuadrática media, H_{max} máxima altura de onda, γ índice de rotura. La energía total de la onda dada en la Ecuación 2-19 y la Ecuación 2-20 se calculan utilizando la Ecuación 2-21.

$$E_w(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_w(x, y, t, \theta) d\theta \quad 2-21$$

Con la Ecuación 2-22 la disipación se distribuye proporcionalmente en todas las direcciones.

$$D_w(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{E_w(x, y, t)} \overline{D_w}(x, y, t, \theta) \quad 2-22$$

Las ecuaciones de momento utilizadas para calcular las corrientes medias, las velocidades orbitales y las elevaciones de superficie contienen un término de fricción (Ruessink et al., 2001) y, por lo tanto, se consideran separadas de la fricción del fondo que tiene un impacto sobre la ecuación de balance de acción de onda. (Ver Ecuación 2-23)

$$D_f \frac{2}{3\pi} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh kh} \right)^3 \quad 2-23$$

Siendo f_w el coeficiente de fricción de la onda corta y T_{m01} el periodo medio. La presencia de vegetación acuática dentro del área de propagación de onda o de rotura de olas resulta en un mecanismo de disipación adicional para ondas cortas.

La vegetación puede ser esquematizada en una serie de elementos verticales cada uno con propiedad específica. De esta manera se puede modelar el efecto de amortiguación de las olas por la vegetación. El término de disipación se calcula entonces como la suma de la disipación por capa de vegetación. (Ecuación 2-24)

$$D_v = \sum_{i=1}^{n_v} D_{v,i} \quad 2-24$$

Donde $D_{v,i}$ es la disipación por vegetación en la capa de vegetación i y n_v es el número de capas de vegetación. La disipación por capa es dada por la Ecuación 2-25.

$$D_{v,i} = A_v \frac{\rho * C_{D,i} b_{v,i} N_{v,i}}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{gk}{2\sigma} \right)^3 H_{rms}^3, \quad \text{con} \quad 2-25$$

$$A_v = \frac{(\sinh^3 k \alpha_i h - \sinh^3 k \alpha_{i-1} h) + 3(\sinh k \alpha_i h - \sinh k \alpha_{i-1} h)}{3k \cosh^3 kh}$$

Donde $C_{D,i}$ es el coeficiente de arrastre abultado, $b_{v,i}$ es el diámetro del vástago de la vegetación, $N_{v,i}$ es la densidad de la vegetación y α_i es la altura relativa de la vegetación (h_v / h) para la capa i . En el caso de que se especifique sólo una capa de vegetación, se supone que las plantas son verticalmente uniformes, un ejemplo típico es la modelación de pasto marino.

2.3.4.2 Balance de energía del roller o rodillo

En la zona donde las olas comienzan a romperse, se espera que se presenten los gradientes más fuertes en los tensores de radiación dando como resultado el set-up y las corrientes a lo largo de las playas. En la práctica hay un retraso, porque la energía de rotura de la ola se almacena temporalmente en el flujo de viaje aparte sobre la ola (rollers de superficie). La disipación de las olas debido a su rotura (D_w) es un término de sumidero en la ecuación de balance de acción de onda corta y un término de fuente en la Ecuación 2-26 de balance de energía del roller.

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x E_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y E_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta E_r}{\partial \theta} = D_w - D_r \quad 2-26$$

Con la energía del roller en cada sector direccional representada por $E_r(x, y, t, \theta)$.

2.3.4.3 Tensores de radiación

Los tensores de radiación forman la conexión entre el balance de acción de onda corta y las ecuaciones de aguas poco profundas. Los tensores de radiación procedentes del balance de acción de onda se obtienen mediante la primera conversión de la acción de onda (A) en la densidad de energía de onda en cada sector multiplicándola por la frecuencia intrínseca. (Ver Ecuación 2-27)

$$S_w(x, y, t, \theta) = A(x, y, t, \theta) * \sigma(x, y, t) \quad 2-27$$

Esto cierra el conjunto de ecuaciones para el balance de acción de onda. Dada la distribución espacial de la acción de la onda (y por lo tanto la energía de las olas), los tensores de radiación pueden ser evaluados usando la teoría de ondas lineales. Los tensores de radiación constan de tres partes: propagación de onda en x (S_{xx}) en y (S_{yy}) y la componente de esfuerzo cortante del tensor de radiación. (Ver Ecuaciones de 2-28 a 2-30)

$$S_{xx, w}(x, y, t) = \int \frac{C_g}{C} \left(1 + \cos^2 \theta - \frac{1}{2}\right) S_w d\theta \quad 2-28$$

$$S_{xy, w}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta \frac{C_g}{C} S_w d\theta \quad 2-29$$

$$S_{yy, w}(x, y, t) = \int \frac{C_g}{C} (1 + \sin^2 \theta - 1/2) S_w d\theta \quad 2-30$$

El balance de la energía del roller desempeña un papel importante en la dinámica de la zona de rompientes incluso responsable de la formación de tensores de radiación. La energía del roller se convierte primero en energía de onda en cada sector direccional tomando la siguiente derivada parcial. (Ecuación 2-31)

$$S_r(x, y, t, \theta) = \frac{\partial E_r(x, y, t)}{\partial \theta} \quad 2-31$$

De nuevo la energía de la onda en los sectores direccionales se descompone en tensores de radiación en las direcciones xx, xy o yx y yy se pueden observar en las Ecuaciones 2-32 a 2-34

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int (1 + \cos^2 \theta - 1/2) S_r d\theta \quad 2-32$$

$$S_{xy,r} \text{ o } yx,r(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta S_r d\theta \quad 2-33$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int \sin^2 \theta S_r d\theta \quad 2-34$$

2.3.4.4 Fuerza inducida por el oleaje

Las tensiones de radiación resultan en fuerzas inducidas por la onda. Las fuerzas inducidas por ondas (F_x y F_y) están forzando términos para las ecuaciones no lineales de agua someras (NLSWE). Como se muestran en las Ecuaciones 2-35 y 2-36.

$$F_x = - \left(\frac{\partial S_{xx,olas} + \partial S_{xx,rodillos}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,rodillo} + \partial S_{xy,roller}}{\partial y} \right) \quad 2-35$$

$$F_y = - \left(\frac{\partial S_{yy,olas} + \partial S_{yy,rodillos}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy,rodillo} + \partial S_{xy,roller}}{\partial x} \right) \quad 2-36$$

2.3.4.5 Ecuaciones de agua poco profundas

Para los flujos de baja y media frecuencia el modelo usa las ecuaciones de aguas poco profundas. Con el fin de obtener el flujo de masa inducido por la onda y el flujo (retorno) subsiguiente, se utiliza las formulaciones de Media Lagrangiana Generalizada (GLM) para aguas poco profundas promediadas en profundidad. En este marco, las ecuaciones de momento y de continuidad se formulan en función de la velocidad de Lagrange, u^L , que se define como la distancia de una partícula de agua que viaja en un intervalo de ola dividido por el período. Esta velocidad está relacionada con la velocidad Euleriana (la velocidad media de onda corta observada en un punto fijo) dada por la Ecuación 2-37;

$$u^L = u^E + u^S \quad y \quad v^L = v^E + v^S \quad 2-37$$

Donde el grupo de onda que varía la energía y la dirección de las ondas cortas se obtienen a partir de la ecuación de balance de acción de la onda (Ecuación 2-10). Las ecuaciones de momento GLM resultantes son dadas por:

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \quad 2-38$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \quad 2-39$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad 2-40$$

Aquí τ_{bx} , τ_{by} son esfuerzos cortantes del fondo, τ_{sx} y τ_{sy} esfuerzos cortantes del viento, η es el nivel de agua, F_x , F_y son los esfuerzos inducidos por la onda, v_h es la viscosidad horizontal y f es el coeficiente de Coriolis. Los términos esfuerzos cortantes en el fondo se calculan con las velocidades eulerianas según experimentan en el fondo. $F_{v,x}$ y $F_{v,y}$ son los esfuerzos por la vegetación.

2.3.4.6 Transporte de sedimento

En el módulo de transporte de sedimentos el modelo utiliza la ecuación de advección-difusión de Gallagher & Vreugdenhil, (1985) promediada en la profundidad (ver Ecuación 2-41).

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad 2-41$$

El arrastre o deposición de sedimentos se determina por la falta de correspondencia entre la concentración de sedimentos C y el C_{eq} concentración de equilibrio que representa por lo tanto el término fuente en la ecuación de transporte de sedimentos. El equilibrio de la concentración de sedimentos se calcula con una fórmula de Soulsby-Van Rijn, 1997 (Ver Ecuación 2-42).

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{U_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad 2-42$$

Donde C representa la concentración media de sedimento que varía en la escala de tiempo de la onda, y D_h es el coeficiente de difusión del sedimento. A_{sb} y A_{ss} es la carga de fondo y carga suspendida respectivamente y son funciones de la profundidad del agua, tamaño del grano y densidad relativa del sedimento. El arrastre de sedimento se representa por T_s , dada por una aproximación basada en la profundidad de agua local y la velocidad de caída w_s . Como se aprecia en la Ecuación 2-43.

$$T_s = \max\left(0.05 \frac{h}{w_s}, 0.2\right)s \quad 2-43$$

2.3.4.7 Cambio del fondo

Dependiendo del transporte de sedimentos, el cambio del nivel del fondo es calculado usando la Ecuación 2-44.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad 2-44$$

Donde z_b es el nivel del fondo, p es la porosidad, f_{mor} es un factor de aceleración morfológica de (1-10) y q_x y q_y representan el transporte de sedimentos en las direcciones x , y , respectivamente.

La tasa de transporte de sedimentos en las direcciones de x y y son calculadas usando las Ecuaciones 2-45 y 2-46.

$$q_x(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C u^E}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] \right] \quad 2-45$$

$$q_y(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C v^E}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] \right] \quad 2-46$$

Para tener en cuenta el desprendimiento en la cara de la duna se aplica el algoritmo avalancha. (Ver Ecuación 2-47). El desprendimiento se produce cuando se excede la pendiente crítica m_{cr} .

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad 2-47$$

Donde la pendiente del fondo se calcula con la Ecuación 2-48.

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{z_{b,i+1,j} - z_{b,i,j}}{\Delta x} \quad 2-48$$

El cambio del fondo dentro de un paso Δz_b está dado por;

$$\Delta z_b = \min \left(\left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \right) \Delta x, 0.05 \Delta t \right), \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \quad 2-49$$

$$\Delta z_b = \max \left(- \left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \right) \Delta x, -0.05 \Delta t \right), \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \quad 2-50$$

2.3.5 Criterios para selección del modelo XBeach

En la zona de costa se pueden implementar diferentes modelos que varían según la temática a estudiar. Debido a la diferentes escalas espaciales y temporales es muy complejo que un modelo describa adecuadamente la morfodinámica de una playa, razón por lo cual, es muy importante identificar el rango espacio-tiempo a investigar para el modelo seleccionar.

Con base en la revisión de las limitaciones de los modelos que hay en la literatura y de acuerdo con la escala y objetivos planteados en la presente investigación se presenta un modelo de propagación bidimensional que se ajusta a las condiciones y eventos a estudiar, ya que considera el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos de la costa ante eventos extremos, como lo es el XBeach, un modelo numérico 2DH (promediado en profundidad) que acopla procesos hidrodinámicos y respuestas morfodinámicas. Se caracteriza por la propagación de ondas cortas, las ondas en aguas poco profundas, el transporte transversal y longitudinal de sedimentos y la evolución morfológica del fondo marino. Adicionalmente, el modelo tiene en cuenta las corrientes de retorno y las oscilaciones causadas en el nivel del mar Roelvink et al., (2009)

Este software proporcionado por Deltares, es una herramienta para calcular el comportamiento y la respuesta a variaciones temporales de la zona costera ante los impactos de huracanes y tormentas. Según Roelvink et al. (2009) el modelo es capaz de simular con mejor precisión el desarrollo del perfil de erosión de las dunas, formación y movimiento de barras y los sucesos que se presentan a lo largo de estas fases. También este modelo permite que diferentes grupos de olas se propaguen en distintas direcciones, por lo tanto, no es necesario el uso de otro modelo para simular la predicción de la dirección media del oleaje. Además, el modelo se ajusta a la investigación porque incluye los Efectos producidos por la vegetación y estructuras duras que han sido validados con una serie de casos en prueba analítica, laboratorio y de campo, utilizando un conjunto parámetros y valores estándar.

El XBeach según Roelvink et al. (2009) tiene en cuenta la retroalimentación entre los cambios batimétricos y la hidrodinámica en cada paso de tiempo (bucle abierto morfodinámico) los resultados del modelo se ajustan relativamente bien a los datos experimentales tanto en playas de arena como en playas de grava.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3 METODOLOGÍA

El presente estudio que tiene como objetivo determinar el comportamiento de las barras sumergidas en un perfil erosivo con presencia de estructuras de protección costeras ante oleajes de régimen medio y régimen extremo para lo cual se utilizará el modelo XBeach en modo estacionario y modo surfbeat respectivamente. Por otra parte, con el fin de determinar el valor añadido de las modelaciones, se realizó una comparación entre el rendimiento de modelos singulares: modelos con sólo modo estacionario o surfbeat. Los modelos singulares fueron calibrados por Zimmermann et al., (2015); Pender & Karunarathna, (2013) quienes realizaron estudios de optimización, aunque las configuraciones son muy dependientes de la ubicación y por lo tanto, los ajustes para la costa australiana y belga no son necesariamente los mejores para la costa Caribe colombiana.

La metodología efectuada para el desarrollo de este trabajo de investigación se basa en los procedimientos típicos que deben ser considerados en un trabajo de modelación numérica, tal como la recolección de información primaria en el campo, recolección de información secundaria a partir de bases de datos nacionales e internacionales y publicaciones de otros autores. El Procesamiento y análisis de información obtenida en campo y laboratorios utilizada para alimentar el modelo numérico. Finalmente se hace la validación del modelo con la información instrumental con que se cuenta en el presente estudio. En la Figura 3-1 se aprecia de forma general la interacción entre todas las líneas de trabajo y luego se presentan de manera detallada las metodologías implementadas en las diferentes etapas de la investigación.

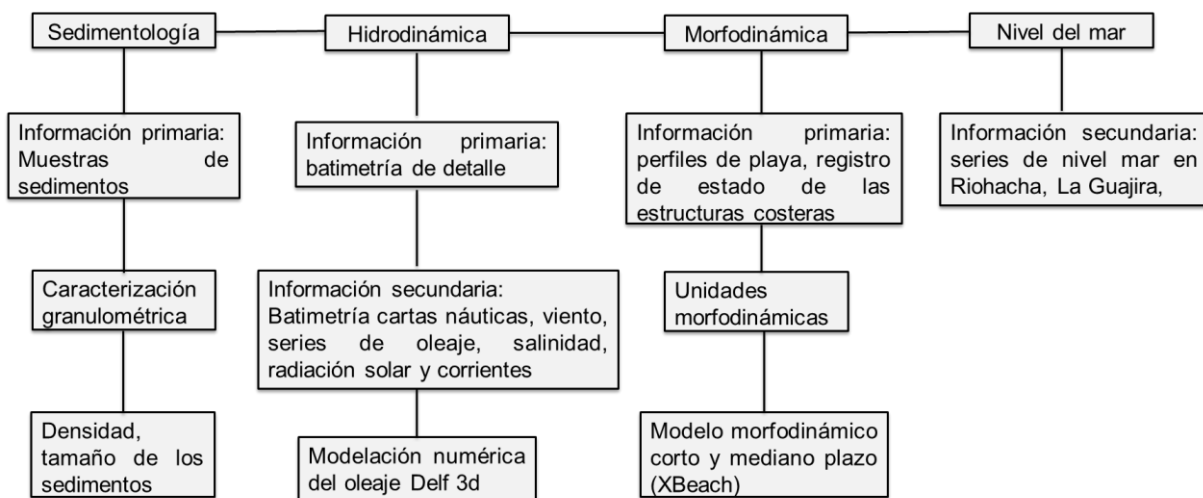


Figura 3-1. Esquema general de la metodología empleada en la investigación

En la sección 3.1 se hace descripción general de la zona de estudio (Localización, fisiografía, características atmosféricas, variables meteomarinas).

En la sección 3.2 se puede encontrar una descripción de la metodología usada para la recolección de información primaria. (Levantamientos batimétricos, toma de muestra, granulometría).

La sección 3.3 presenta el análisis de clima marítimo de la zona de estudio desarrollado para las diferentes modelaciones en la presente investigación.

En cuanto a la sección 3.4 se elaboran los ajustes del modelo de referencia y se detallan las condiciones de frontera (batimetría, oleaje y marea) y características del grano de sedimento que se utilizan en las simulaciones.

La sección 3.5 detalla el estudio de calibración del modelo para los modos estacionarios y surfbeat. La metodología para el análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros (facua, wetslp, lws, lwave). En este estudio también se discute el valor añadido de los modelos 2D para el modelado de corto y largo plazo. Los modelos 2D son diferentes de 1D, incluso si el modelo 2D es uniforme a lo largo de la costa. Una de las principales diferencias es la forma en que las ondas de infragravedad se propagan a través del modelo. (Ver sección 3.5.1).

La sección 3.6 presenta los criterios y métodos de evaluación que se utilizan en este estudio para la validación de las diferentes simulaciones realizadas y el grado de predicción y certeza que se obtiene con el modelo.

Por otra parte, con el fin de cumplir los objetivos del presente estudio se muestra en la sección 3.7 los escenarios de modelación de las condiciones actuales de la zona de estudio.

Por último, en la sección 3.8 se especifican diferentes escenarios a modelar con diferentes configuraciones de soluciones de protección costera con el fin de dar respuestas a los diferentes interrogantes de investigación planteados y por los cuales, se ha desarrollado el presente estudio.

3.1 GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Caribe colombiano está localizado en el extremo norte de Suramérica. Tiene una longitud de línea de costa de 1.642 km, un área terrestre aproximada de 194.513 km² y ocupa un 11% de la superficie del país (CORPOGUAJIRA & INVEMAR, 2012)

Mientras que Riohacha, capital del departamento de La Guajira, como se observa en la Figura 3-2 se encuentra en la parte media de la zona costera del departamento, (11°32'N y 72°54'W) con una extensión de 46 Km de costa, constituyendo el 7,0% del total del departamento. La zona de estudio se extiende desde la desembocadura del río Ranchería (11°33'18"N y 72°54'22"W) hasta los acantilados del barrio José Antonio Galán (11°32'39"N; 72°55'38"W); abarcando una extensión de 2,5 Km aproximadamente, que equivalen al 5,4% del total de costa del municipio. Estas playas se encuentran delimitadas por construcciones asociadas a la protección costera.

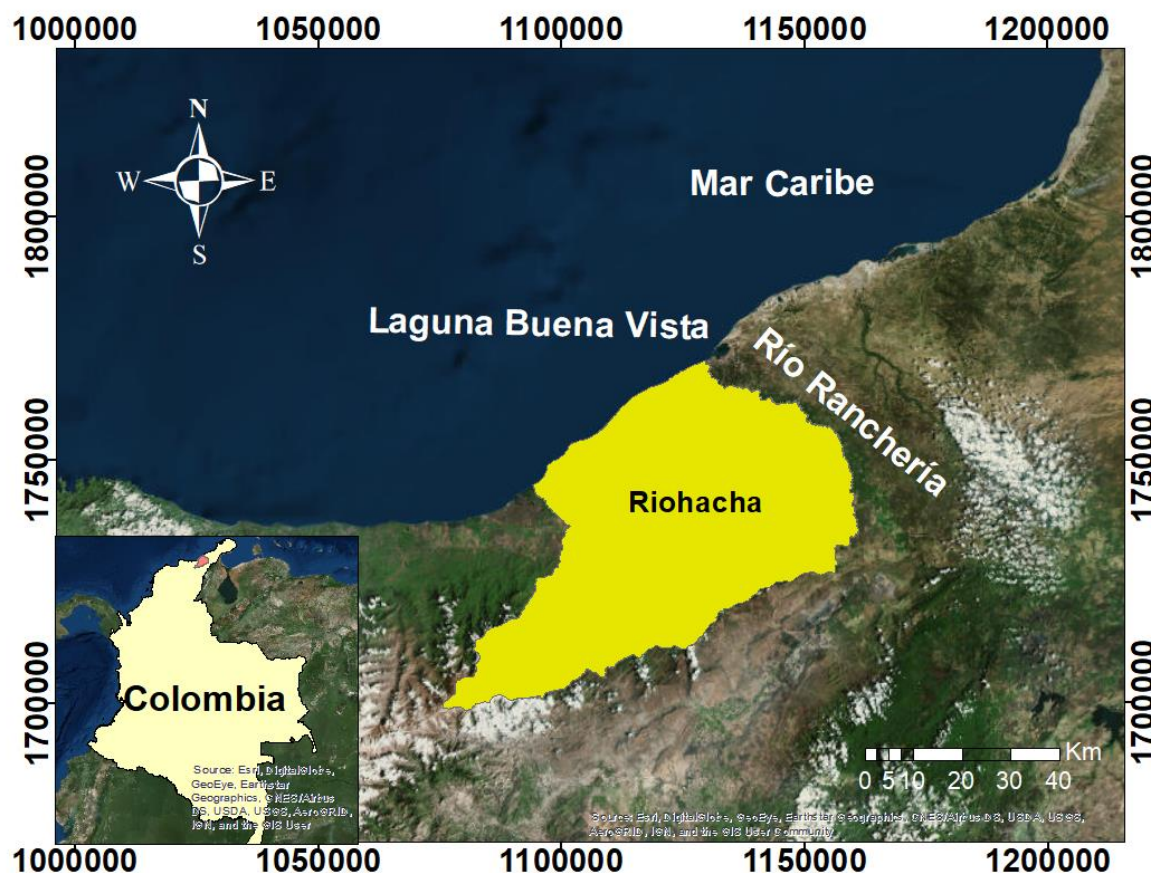


Figura 3-2. Ubicación Geográfica del sector de estudio

Los procesos erosivos en las costas del municipio de Riohacha han producido un retroceso en la línea de costa, razón por la cual fue necesario implementar medidas de recuperación y protección (ver Figura 3-3). Con el fin de revertir la problemática construyeron 8 estructuras, siete (7) espolones y un (1) dique emergido. Las estructuras ubicadas en dirección NW, están separadas por una distancia aproximada de 200 m. En la Tabla 3-1, se aprecia el estado de actual de las estructuras presentes en la zona de estudio.

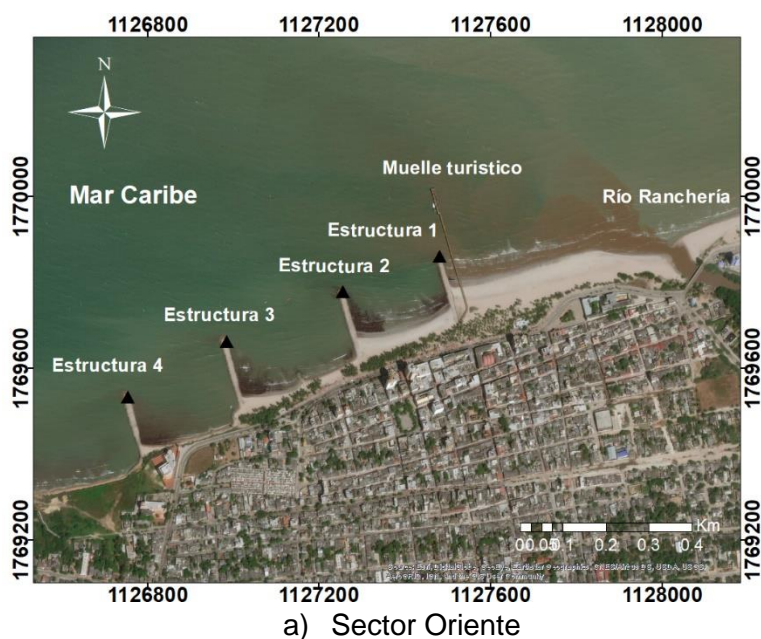


Figura 3-3. Ubicación geográfica de las estructuras de protección en las playas de estudio

Tabla 3-1. Estado actual de las estructuras y procesos de transformación del oleaje

N°	Tipología estructural	Ubicación (m)		Estado
		Norte	Este	
1	Espolón	1769710,43	1127513,6	Sin fallas, pero con afectaciones en las partes laterales (material corrido), se presenta el proceso de difracción.
2	Espolón	1769621,13	1127280,17	Sin falla estructural, pero con afectaciones en las partes laterales (material corrido) se presenta el proceso de difracción
3	Espolón	1769468,457	1127020,86	Sin falla estructural, se observa proceso de difracción y refracción
4	Espolón	1769576,281	1126781,95	Sin falla estructural, se observa proceso de difracción y refracción
5	Espolón	1769311,634	1126237,53	Sin falla estructural, se observa proceso de difracción y refracción
6	Espolón	1769313,476	1126245,8	Sin falla estructural, se observa proceso de reflexión
7	Dique emergido	1768733,894	1125329,09	Sin fallas, conformación de tómbolo y seno de erosión a cada lado, se observa difracción, además de sedimento con alto contenido de arcilla y materia orgánica
8	Espolón	1768635,835	1125172,15	Con falla estructural, se presenta difracción en punta de espolón, refracción, reflexión por acantilado

3.1.1 Fisiografía

La mayor parte de la costa Caribe colombiana está conformada por la llanura Caribe, que se extiende hacia el norte de las estribaciones de las cordilleras Occidental y Central (Serranías de Abibe, San Jerónimo). Su relieve es ondulado a plano, muy cercano al nivel del mar, con colinas que en general no superan los 500 m de altura, a excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta, que se levanta como un macizo aislado con alturas de hasta 5.770 m y algunas serranías en La Guajira. (CORPOGUAJIRA & INVEMAR, 2012).

3.1.2 Variables atmosféricas.

La información de parámetros atmosféricos para caracterizar el área de estudio se obtuvo de las bases de datos North American Regional Reanalysis: NARR (NOAA - NCEP., 2016) y del instituto de estudios ambientales IDEAM que monitorea la zona con las estaciones meteorológicas.

La base de datos NARR contiene una variedad de información de la cual se pueden extraer vientos, flujos de calor, radiación solar, humedad, entre otros. Con una serie de datos que inicia desde el 01 enero 1979 hasta el 31 de diciembre de 2015 con registro cada 3 horas diaria, horaria, y mensual del hemisferio de Centroamérica y El Caribe (Figura 3-4), distribuida en coordenadas *Lambert Conformal Conic*.

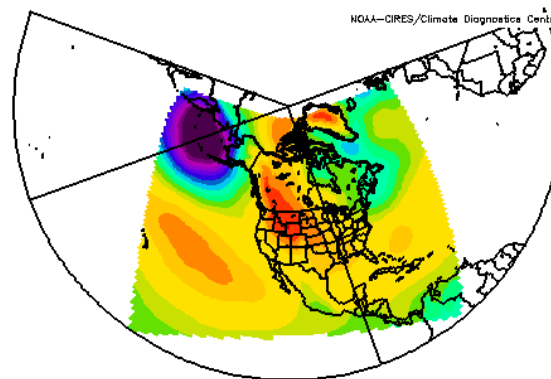


Figura 3-4. Cobertura de la información de Reanálisis NARR

Mediante el análisis de los registros obtenidos en la base de datos NARR, se extrajo la información horaria y mensual de las zonas de estudio, con el objetivo de conocer la variabilidad de viento durante los 37 años en el área comprendida a la zona media de Riohacha en el departamento de La Guajira, así como la variación mes a mes de la temperatura ambiente, la radiación solar media diaria, la humedad relativa y los vectores de viento superficiales.

▪ Temperatura

La Guajira tiene una variedad de climas de acuerdo con su fisiografía y comprende áreas como la Sierra Nevada de Santa Marta con temperaturas bajo cero, zona de páramos, en el cerro Pintao, y zona costera a nivel del mar con temperatura promedio anual de 29°C. Siendo el 94% del territorio cálido y seco al nivel del mar. (Corpoguajira & Invemar, 2012). La zona presenta una temperatura media anual de 27.9°C y con extremos de máxima y mínima anual de 30.5 y 24.4°C respectivamente. (IDEAM, 2016).

▪ Precipitación

La precipitación está regida por los movimientos de los vientos debido que a su paso por las bajas serranías y grandes planicies del norte, generan condiciones de sequedad y aridez y al encontrarse de frente con las cadenas montañosas de la sierra nevada, generan mayor precipitación, donde el valor promedio anual de pluviosidad aumenta de noreste a suroeste que van de 200 a 2000mm. (Corpoguajira & Invemar, 2012).

La precipitación a lo largo del año presenta una distribución bimodal con una temporada lluviosa en el primer semestre concentrado en los meses de abril, mayo y junio, y el segundo semestre con mayores registros de precipitación en septiembre, octubre y noviembre, separados por un verano corto. Durante los meses de diciembre, enero y febrero se presenta la temporada de estiaje un poco más intensa. En la zona se alcanza una precipitación media 636 mm y alcanzando una máxima de 1177 mm (IDEAM, 2016).

▪ Velocidad del Viento

En la Figura 3-5 se observa la variación mes a mes del viento en la zona media del departamento de La Guajira en un periodo de 37 años (1978-2016). La velocidad media anual del viento obtenida de la base de datos indicó un valor de 5 m/s, y una dirección del 201° (Nornoreste), además se identificaron máximas velocidades de viento hasta de 12 m/s.

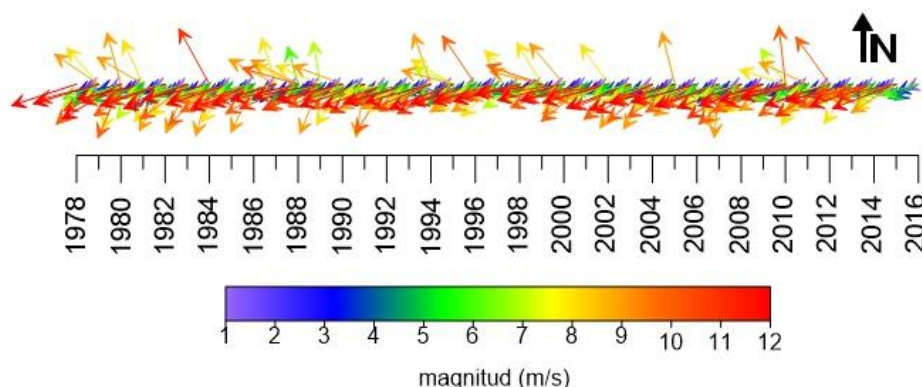


Figura 3-5. Variación del viento promedio mensual de La Guajira.

▪ Humedad Relativa

La humedad relativa es definida como la relación porcentual entre la cantidad de humedad en un espacio dado y la cantidad que ese volumen podría contener si estuviera saturado. El promedio multianual de este parámetro para la ciudad de Riohacha es de 74%. Los promedios mensuales más altos se presentan durante los

meses de septiembre a enero y de abril a mayo, debido principalmente a las precipitaciones que ocurren durante estos meses. Los meses con los valores promedios más bajos de humedad relativa corresponden a junio y julio los cuales se encuentran por debajo del 68%; causado principalmente por la falta de precipitaciones durante este tiempo. (IDEAM, 2016).

▪ **Brillo solar**

El brillo solar medido en h/año, tiene incidencia en los procesos de evaporación y transpiración que suceden en la zona. De acuerdo con las estaciones climatológicas el valor promedio multianual de brillo solar en la región media es 2421,7 h. En el mes de enero se presenta la mayor radiación, seguido de julio y diciembre. (IDEAM, 2016).

▪ **Evaporación**

Consiste en el agua en estado de vapor que asciende a la atmósfera, siendo varios factores los que inciden en su formación, entre otros, el brillo solar, el tipo de suelo y la temperatura. El promedio multianual de evaporación para la zona de estudio es 2114 mm, aunque más al norte aumenta a 2610,2 mm. Durante los meses de julio y agosto, en los cuales los promedios de evaporación son los más altos, por encima de los 240 mm. (IDEAM, 2016).

3.1.3 Características meteomarinas

En este apartado se describen las características oceanográficas de la zona de estudio más importantes que influyen en la evolución de un perfil de playa.

▪ **Salinidad superficial del mar**

En las aguas costeras de la zona de estudio esta variable al igual que la temperatura superficial presenta fluctuaciones marcadas; se observa un descenso en el valor de las salinidades desde el norte hasta el sur de La Guajira contrario al de la temperatura que va de sur a norte. Los valores más altos de la salinidad se observan al norte de la península de La Guajira con un valor máximo de 36.27 psu. En la zona la salinidad desde enero hasta febrero disminuye sus valores, desde febrero hasta octubre se registra un aumento de salinidad (el máximo de concentraciones de salinidad) y desde octubre hasta diciembre nuevamente se ve una disminución. (IDEAM, 2008).

▪ **Temperatura superficial del mar**

Para el sector Nororiental de Caribe colombiano la variación de la temperatura superficial es significativa a lo largo del año; los meses más fríos son diciembre –

marzo, coincidentes con el periodo en que los vientos alisios del noreste alcanzan su mayor influencia, y caracterizan la mayor época seca. (IDEAM, 2008).

▪ **Mareas**

En el Caribe colombiano, las mareas son de tipo mixto, semidiurno, micromareal, con amplitudes alrededor de 0,3 m y máximas de 0,5 m adicionalmente presentan intervalos de oscilación de pleamares entre 10 y 14 h, con mayor frecuencia cada 11,5 h. (IDEAM, 2016).

▪ **Huracanes**

En esta zona del Caribe es común la presencia de huracanes en el periodo de junio a noviembre; sin embargo, según la información obtenida de la National Hurricane center (<http://www.nhc.noaa.gov/>) la afectación sobre la costa Caribe colombiana es inferior al 1% y está representada por vientos fuertes, abundantes lluvias y mares de leva. Durante este periodo, la península de La Guajira ha sentido el paso de varios huracanes y tormentas tropicales en los últimos 50 años, en cambio sobre toda la costa se sienten durante el periodo seco (diciembre a abril) las consecuencias de los mares de leva, ocasionados por el efecto de fricción entre la superficie del mar y masas de aire atmosférico de baja presión, que empujan las aguas oceánicas hacia la costa causando un fuerte oleaje.

3.1.3.1 Información de corrientes marinas.

Para las zonas de estudio se logró identificar la base de datos de información primaria de corrientes (COPERNICUS., 2017). Dicha base de datos de corrientes presenta una resolución espacial de 0.08 grados, y mediante esta se puede acceder a información diaria y horaria a diferentes profundidades. La información de la base de datos es posible descargar desde noviembre de 2006 a la actualidad, por lo que se considerará la información del 2016 como referencia para la validación de los resultados del modelo hidrodinámico.

▪ **Sistema de corrientes**

Las corrientes de deriva a lo largo de la costa de La Guajira tienen una marcada tendencia SW, confirmada por la presencia de sedimento en la cara NE de todos los espolones construidos en las playas de Riohacha. En las mediciones realizadas por Invemar & Corpoguajira, (2008) con boyas de deriva muestran esta misma tendencia SW con velocidades de: 0.2 / 0.3 / 0.2 / 0.45 m/s. Los valores muestran un claro aumento en las velocidades de las corrientes de deriva de sur a norte debido a que en esta misma dirección aumentan las velocidades de los vientos y los periodos de oleaje al llegar a la costa.

▪ Corrientes marinas

La corriente del Caribe domina la costa norte de la cuenca de Colombia, producida por la circulación ciclónica que ocasiona una corriente central que se mueve a una velocidad promedio de 0.57-0.81m/s con dirección oeste y sur cuando la zona de convergencia intertropical está en posición meridional, durante la época de verano (NOAA, 2015). Al aproximarse a Panamá, la corriente Caribe se dobla hacia el sur y después al este, produciendo de esta forma una contra corriente denominada contracorriente de Panamá, favorecida por el régimen de vientos del Caribe occidental. En época seca se desplaza hasta los alrededores de la desembocadura del Magdalena y logra su máxima trayectoria frente a las costas de La Guajira durante la época húmeda.

3.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Tres campañas de campo fueron realizadas entre el junio y diciembre del 2016. Donde se realizó un diagnóstico y toma muestras de sedimentos. En cuanto al seguimiento a las geoformas de playa, los trabajos fueron iniciados desde la primera campaña (junio de 2016) con mediciones periódicas de los perfiles de playa (ver Tabla 3-2) para efecto de este estudio y como se evidencia en la Figura 3-6 se tuvo en cuenta una zona de interés con un perfil de control. Tales mediciones se intensificaron tras el paso del huracán Mathew en noviembre del 2016 con tal de tener información de la zona de estudio influenciada por un fenómeno de bajas presiones que ocasionara condiciones meteorológicas extremas.

Tabla 3-2. Fechas de las mediciones de campo en las playas de Riohacha

Numero de mediciones	Fecha de mediciones	Condiciones climáticas
1	Julio 2016	Oleaje moderado
2	Octubre 2016	Oleaje moderado
3	Noviembre 2016	Oleaje extremo



Figura 3-6. Ubicación de zona de interés y perfil de control

La información secundaria utilizada en este trabajo incluye la serie histórica de las estaciones meteorológicas Matitas y Almirante Padilla de Riohacha monitoreadas por el IDEAM, otras series de tiempo secundarias utilizadas para las modelaciones fueron magnitud y dirección del viento, batimetría y radiación solar.

En las campañas de campo se tomaron muestras de sedimentos de las playas de Riohacha. Donde se recolectaron dos (2) muestras por perfil, en playa seca (Figura 3-7a) y playa sumergida (Figura 3-7b) en ocho perfiles a lo largo de la costa (Figura 3-8) que se establecieron previamente para asegurar la caracterización homogénea de la zona de estudio. Inicialmente, se georreferenció el punto de muestreo, y se marcó una bolsa hermética con el código y las características del lugar; posteriormente se obtienen las muestras con un recipiente, asegurando tomar la misma cantidad de sedimentos en cada punto de interés.



a) playa seca



b) playa sumergida

Figura 3-7. Procedimiento de toma de muestras de playa.

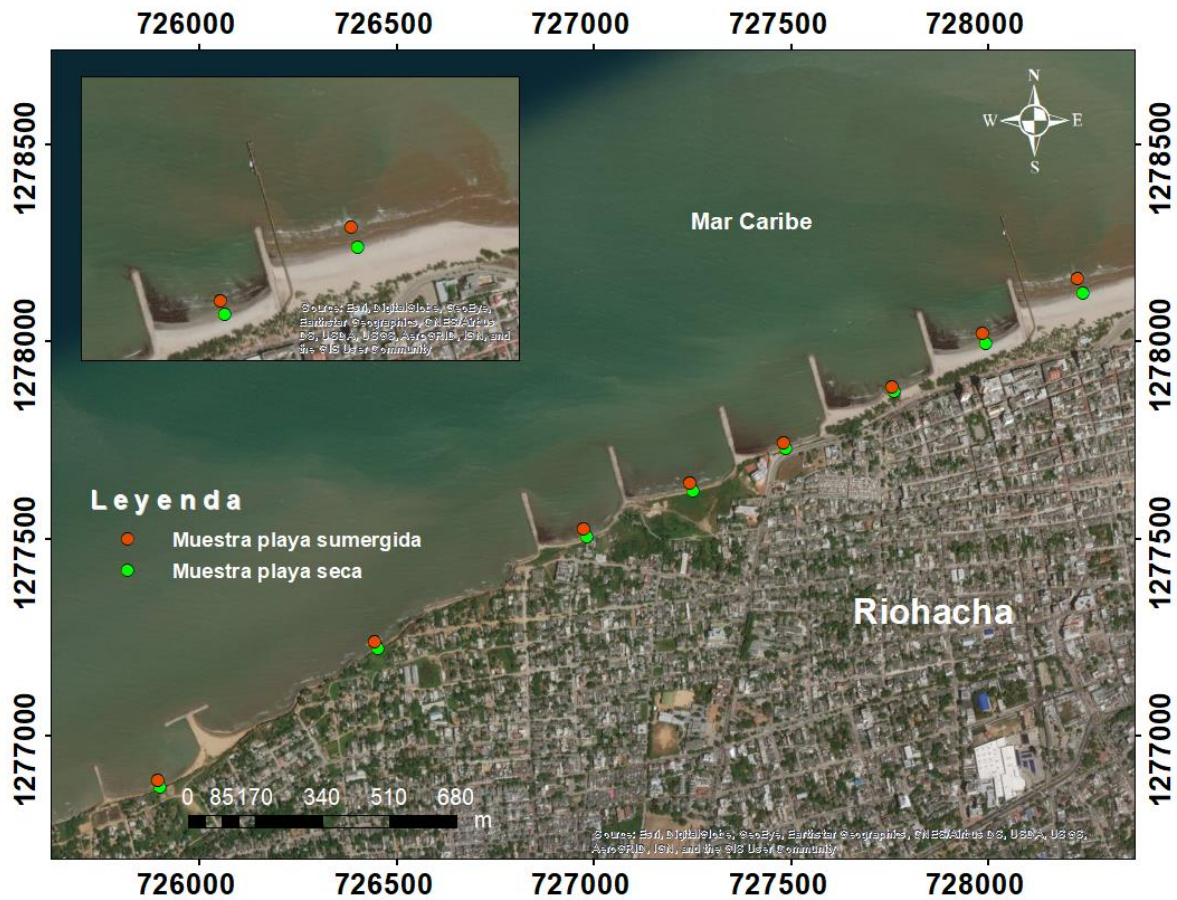


Figura 3-8. Distribución de las muestras de sedimentos a lo largo de la costa

En total se obtuvieron 16 muestras de playa y 16 muestras de fondo, las cuales fueron secadas, pesadas y tamizadas para el análisis granulométrico. Donde se obtuvieron los datos de caída del grano D_{50} y D_{90} mediante un ensayo de laboratorio diseñado por el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) denominado Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino, norma I.N.V. E -213, con el cual se cuantificó la distribución de los tamaños de los granos de sedimentos mediante el tamizado INVIAS, (2013) y de esta forma calcular los parámetros estadísticos texturales para cada muestra.

3.2.1 Hidrodinámica

Se hizo un análisis de la hidrodinámica de mareas y del oleaje. La caracterización de las variables físicas y meteorológicas incluidas en esta componente son fundamentales para el planteamiento del modelo morfodinámico del sistema, incluyendo la determinación de los sistemas de corrientes y el transporte de sedimentos inducido por la rotura del oleaje y los ciclos mareales.

- **Oleaje**

La información de oleaje en aguas intermedias y profundas permitirá caracterizar los estados de mar en las zonas de estudio y de esta manera clasificar las condiciones medias y extremas. Para determinar la variabilidad estacional e interanual del oleaje en aguas profundas y su posterior modelación hasta pie de playa, se usó una serie de altura de ola significativa (H_s), período pico (T_p) y dirección (Dir) de boyas sintéticas e instrumentales pertenecientes a la DIMAR. En la Figura 3-9 se pueden apreciar las boyas disponibles en la zona de estudio.

La información de oleaje sintético se adquirió a través de la empresa *Buoyweather*. Las series de oleaje sintético fueron generadas mediante el modelo WAVEWATCH III, las cuales poseen una resolución temporal horaria y un periodo de 30 años.

Para conocer la dinámica del oleaje en la playa de Riohacha, se usó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) Booij et al., (1999) para propagar 30 años (1986-2016) de la serie de oleaje sintético y obtener la información para forzar el modelo XBeach. Este modelo desarrollado para propagar el oleaje cerca de la costa y reproduce de manera adecuada los procesos de generación y transformación del oleaje.

El modelo fue forzado con vientos a 10 m de altura, de la base de datos de reanálisis NARR (NOAA - NCEP, 2016). La información de profundidades y elevaciones de las zonas de estudio se obtuvo de la base de datos internacional ETOPO 1 (NOAA., 2015), la cual posee una resolución espacial de 0.0167° (1.85 km) combinados con

levantamientos de detalle realizados en campo (junio del 2016) y con cartas náuticas obtenidas por la DIMAR.

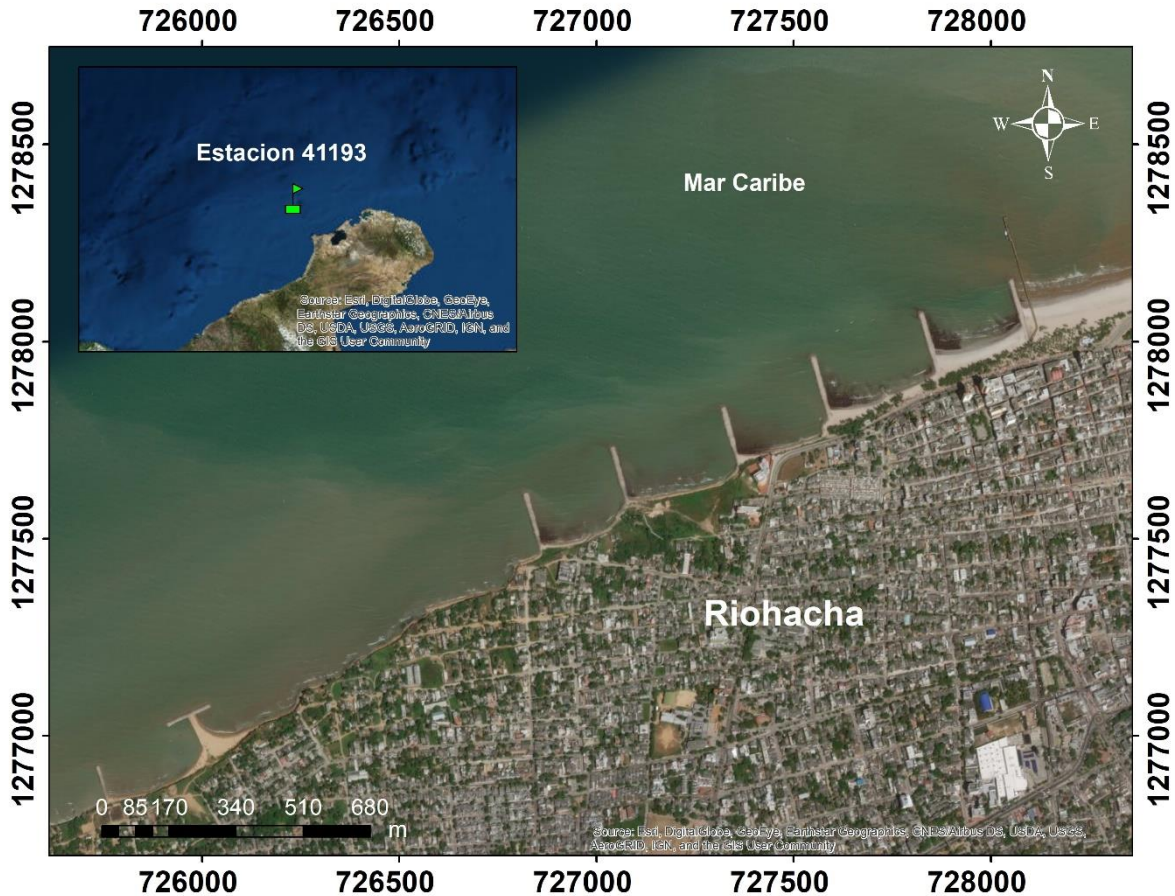


Figura 3-9. Ubicación de la boya disponible en zona de estudio

- **Marea**

La hidrodinámica de este forzador fue obtenida de la base de datos de reanálisis (HYCOM, 2012). Que posee una resolución espacial y temporal de 0.08° y 12 años (1995-2012) respectivamente. Esta base de datos pertenece al laboratorio de investigación de la Naval y Presenta una frecuencia de registro de datos cada 3 horas.

Los cálculos son desarrollados por el modelo dinámico HYCOM 2.2, estos se llevan a cabo en la cuadrícula de cálculo GLBb0.08, la batimetría utilizada es de la base de datos GEBCO de 30 segundos de resolución, el forzamiento de superficie es de 1 hora e incluye los esfuerzos y la velocidad del viento, el flujo de calor (usando la fórmula a granel) y la precipitación. El ciclo diurno se resuelve adecuadamente debido a la frecuencia temporal del forzamiento de entrada.

3.3 ANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO

En esta sección se hace el análisis de clima marítimo de la zona de estudio con el fin de caracterizar las condiciones de oleaje de la zona de interés y de esta manera identificar los estados de mar medios y extrémales en las zonas costeras.

La carencia de información instrumental estadísticamente representativa, como es la serie de oleaje instrumental de más de 10 años en la zona media del departamento de La Guajira, fue solventada mediante el procesamiento de información de oleaje del modelo WAVEWATCH III que tiene una resolución temporal horaria y un periodo de 30 años.

El modelo de oleaje de tercera generación WAVEWATCH III desarrollado por la NOAA/NCEP, se basa en un modelo de tercera generación conocido como Wind Wave Model (WAM), por sus siglas en inglés. El modelo resuelve la fase espectral empleando la ecuación de balance de acción de densidad (action density balance equation, por sus siglas en inglés). El modelo WAVEWATCH III maneja escalas espaciales mayores con aplicaciones de meso escala y escala global, por lo que el modelo es idóneo para generar oleaje en aguas profundas e intermedias, considerando el efecto de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Los puntos virtuales permiten extraer información de un sitio o localidad dentro de la extensión espacial de la base de datos. Estos puntos virtuales o nodos de pixel contienen información de los parámetros de ola (dirección, altura significativa y período), la cual se organiza en series de tiempo. Las series de tiempo permiten identificar los estados de mar representativos mediante análisis estadísticos, como también sirven de información de entrada para las condiciones de frontera de los modelos numéricos. A continuación, se presenta el punto virtual para la zona de estudio, muy cercano a Riohacha (Figura 3-10).

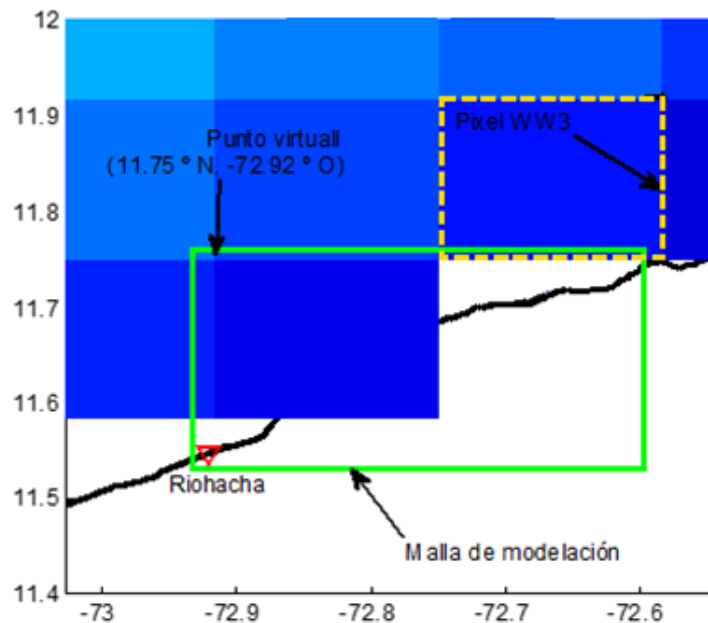


Figura 3-10. Localización de punto virtual para el sector de estudio.

- **Punto virtual 11.75° N, -72.92° O.**

En el punto virtual localizado en 11.75° N, -72.92° O (Figura 3-10), se identificó un oleaje medio asociado al 50% de probabilidad de excedencia, con una altura significativa de 1.30 m, y un oleaje extremal (95%) con una altura significativa de 1.99 m para la serie de tiempo comprendida entre 01-ene-1979 a 31-dic-2007 (ver Figura 3-11).

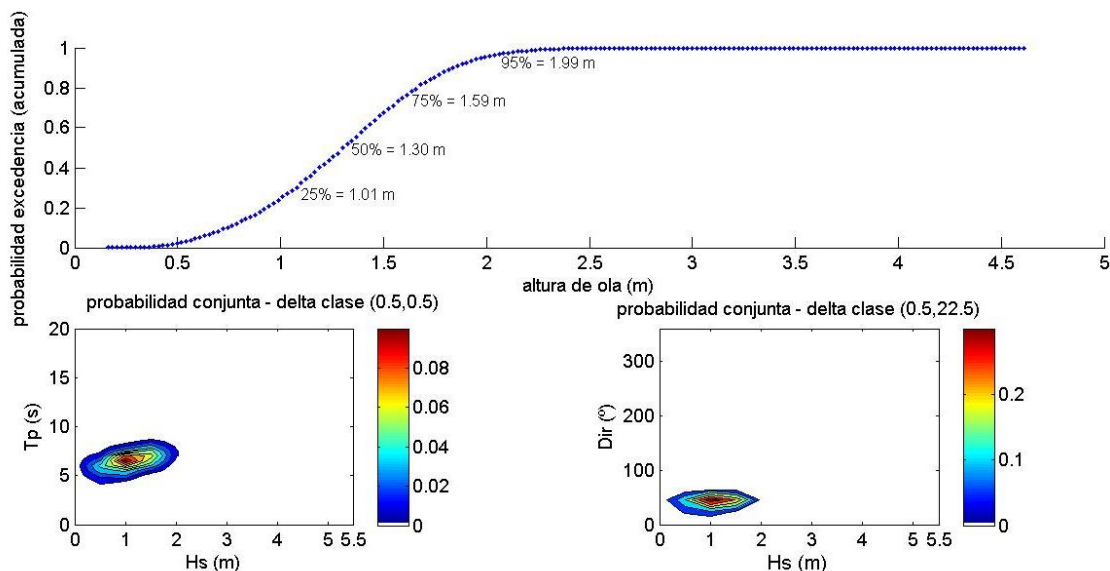


Figura 3-11. Curva de probabilidad de excedencia y probabilidad conjunta del punto virtual (11. 75° N, -72. 92° O)

Con base a los resultados de probabilidad conjunta altura significativa – periodo pico (Figura 3-11), obtenido del punto virtual, la mayor probabilidad se encuentra para una altura significativa de 1 m y un periodo pico de 6.5 s. La probabilidad conjunta entre la altura significativa y la dirección (Figura 3-11), se halló con un valor de 1.8 m y 45° respectivamente.

Con base en la curva de probabilidad de excedencia extremal, construida a partir del conjunto de datos por encima del umbral del 95% (1.99 m), se encontró que el oleaje extremo más recurrente, según el 50% de probabilidad de excedencia (segundo cuartil) visto en la Figura 3-12b, ha presentado una altura de 2.11 m, y el oleaje extremal crítico, el cual supera el 95%, comprende desde los 2.49 m hasta el máximo registro de altura significativa de 4.62 m.

La rosa de oleaje de la serie sintética (Figura 3-12a), indicó que la dirección predominante del oleaje proviene entre los 35° y 45°, un valor medio de altura significativa entre los 1 y 1.5 m; según la rosa de oleaje los máximos de altura de ola significativa se encuentran entre los 4.5 y 5 m.

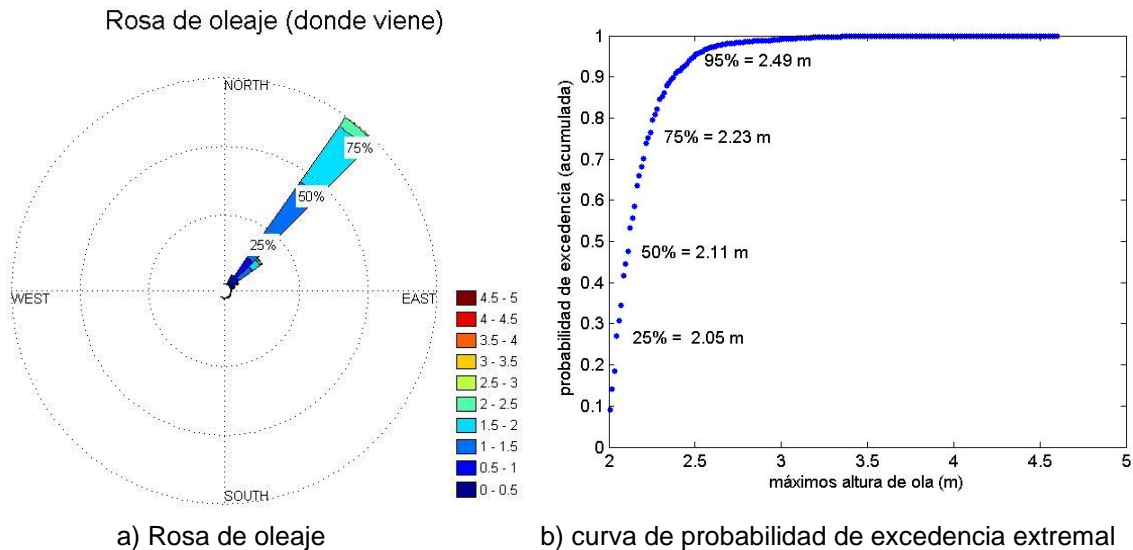


Figura 3-12. Punto virtual 11.75 ° N, -72.92 ° O

A partir de la curva de probabilidad de excedencia (Figura 3-12b), se definió el umbral para la identificación de valores máximos en la serie de tiempo, representado por la línea recta sobre la Figura 3-13.

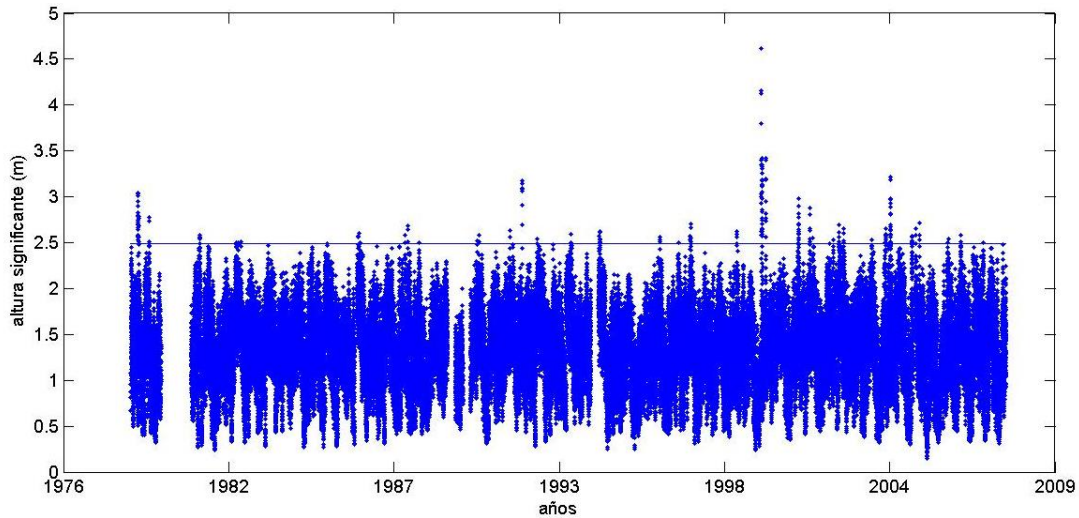
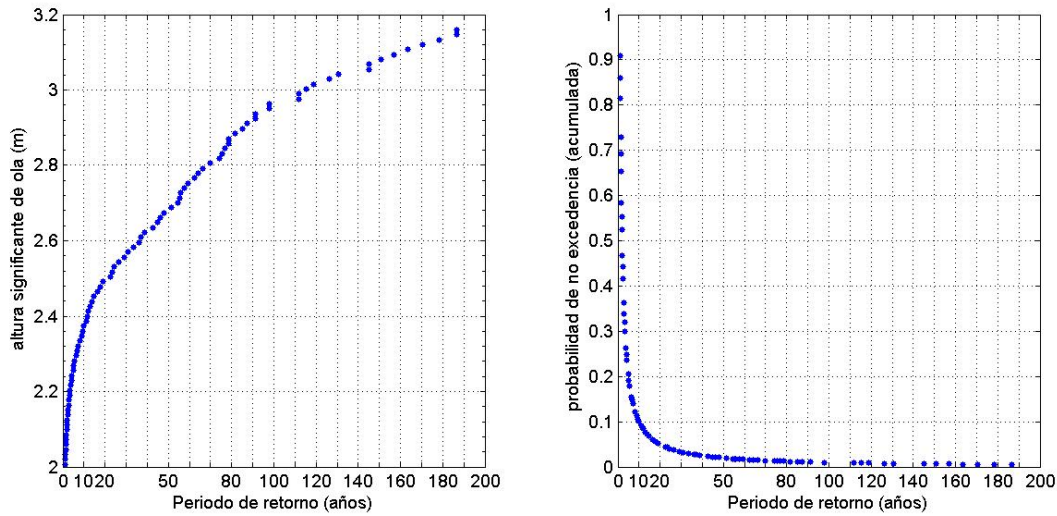


Figura 3-13. Serie de tiempo de altura significativa de ola del punto virtual (11.75 ° N, - 72.92 ° O)

Tomando el conjunto de información de oleaje por encima del umbral del 95% (1.99 m) y su análisis probabilístico de excedencia (Figura 3-12b), se construyeron las curvas de periodos de retorno para el régimen extremal de oleaje (Figura 3-14). Con base en el periodo de retorno para 5 años, se espera que la probabilidad de que la altura significativa supere los 2.26 m con es de 0.19%, y para un periodo de retorno de 20 años, la probabilidad de que la altura significativa supere los 2.5 m es de 0.05%. La probabilidad para que en el punto virtual se presente un oleaje de 3 m es de 0.008%, asociado a un periodo de retorno de 115 años (Figura 3-14).



a) Período de retorno para altura significativa b) Período de retorno para probabilidad de no excedencia.

Figura 3-14. Curva de régimen extremo para el punto virtual 11.75 ° N, -72.92 ° O

Tomando la información de la serie de tiempo del punto virtual (Figura 3-12) se identificaron 20 grupos de clasificación mediante la técnica de K-medias, y según el centroide de cada grupo (Figura 3-15), fue posible definir los estados de mar en aguas profundas. Los resultados del análisis de clúster pueden observarse en la Tabla 3-3.

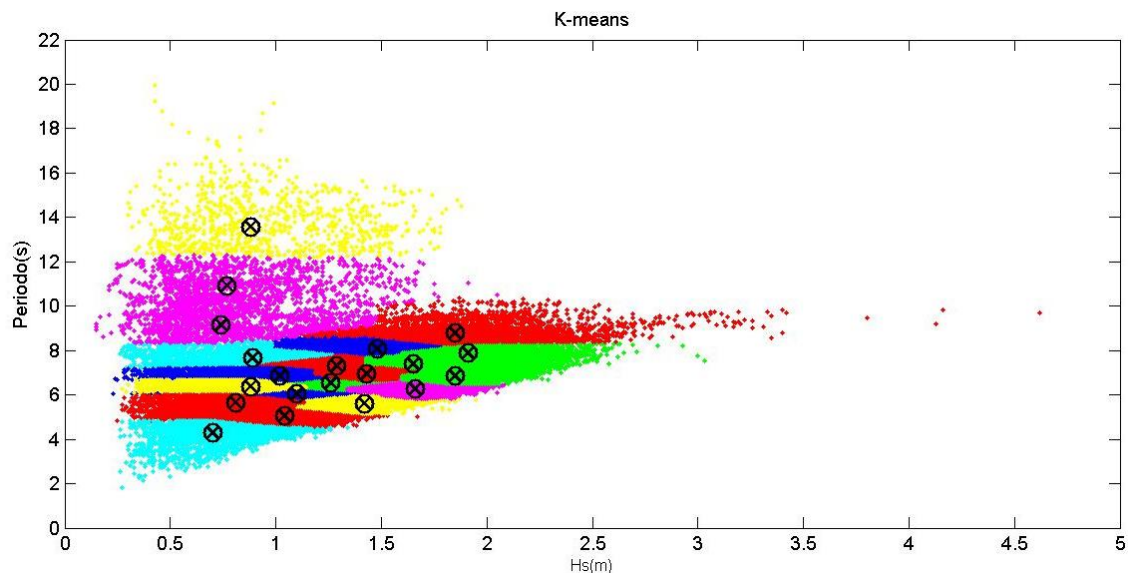


Figura 3-15. Análisis de clúster con 20 grupos punto virtual (11.75 ° N, -72.92 ° O)

Tabla 3-3. Valores de los centroides que representan los estados de mar definidos a través de análisis de clúster tipo k-means.

Clúster	Altura significativa – Hs (m)	Periodo pico – Tp (s)
1	1.04	5.05
2	1.48	8.08
3	1.91	7.88
4	0.89	7.68
5	1.29	7.31
6	0.88	13.58
7	1.85	8.79
8	1.10	6.05
9	1.26	6.53
10	1.65	7.41
11	1.02	6.87
12	1.42	5.62
13	0.70	4.30
14	1.43	6.95
15	1.66	6.28
16	1.85	6.86
17	0.88	6.38
18	0.74	9.16
19	0.77	10.92
20	0.81	5.66

Con base a los resultados anteriores, se determinaron las alturas máximas de ola a partir del umbral del 95% de confianza, permitiendo así identificar los eventos extremos, y a partir de estos, seleccionar periodos de tiempo para analizar en detalle los eventos registrados y estimar condiciones futuras a partir de ajustes de curvas de probabilidad espectral. Adicionalmente, el análisis de clúster facilitó la identificación los estados de mar representativos en aguas profundas del área de estudio (Tabla 3-3).

3.4 MODELO DE REFERENCIA

La metodología establecida para simular los diferentes escenarios con el fin de determinar el comportamiento de la evolución de un perfil comenzó con la compilación del modelo XBeach versión 1.224867 Kings Day software de código abierto de Deltares.

Se eligieron dos periodos de tiempo para simular la evolución del fondo marino; el primero de 3 meses durante la estación de verano, donde probablemente no ocurren eventos meteorológicos extremos, y otro con un intervalo de 5 días, que representa el número de días por año que se han identificado intensos oleajes (huracanes) en la costa Caribe de acuerdo con la información obtenida en el registro de oleaje (ver sección 3.3). En el modelado a mediano plazo (modo estacionario) se creó un modelo de referencia al igual que en modo surfbeat (corto plazo) basado en el modelo estándar. En la Tabla 3-4 se presentan los ajustes específicos para el modo estacionario y el modo surfbeat.

Tabla 3-4. Diferentes parámetros para modo estacionario y surfbeat

parámetros	Estacionario	Surfbeat
instat (condición de frontera-oleaje)	stat	jons
rotura (modelo de rotura)	baldock	roelvink_dary
gamma (índice de rotura)	0.78	0.541

La mayoría de los ajustes se mantuvieron en los valores predeterminados asignados por XBeach. En la

Tabla 3-5 se observan los parámetros que no tenían un valor por defecto en el modelo y dependen de las condiciones de la zona de interés. Estos ajustes se utilizan en todos los demás modelos excepto cuando se describe de otra manera.

El parámetro Morstart se establece en un valor de 36000 s o 10 h. La opción Morstart detiene la actividad morfológica durante 10 h, lo que proporciona el tiempo del modelo XBeach para desarrollar la acción hidrodinámica en el modelo (onda y corrientes). Por otra parte, se utilizó un morfac de 10 y 5 para todos los modelos en modo estacionario y surfbeat respectivamente. En los anexos se puede evidenciar el ejemplo de un archivo en el que se definen todos los ajustes definidos del modelo de referencia XBeach.

Tabla 3-5. Ajustes utilizados en los modelos de referencia en modo estacionario y surfbeat

Parámetros	valor	unidad
condiciones de frontera	Oleaje y marea	[-]
morstart	36000	s
D50	0.000139	m
D90	0.000183	m
waveform	ruessink_vanrijn	[-]
form	vanthiel_vanrijn	[-]
turbulencia	wave_averaged	[-]
morfac	10;5	[-]
lwave	1;0	[-]
Revision XBeach	1.224867 Kings Day (rev 5255)	[-]

En los estudios de modelación morfológica, el término a largo plazo se suele utilizar para modelos de varios años hasta varias décadas. El uso de estos modelos en el presente estudio se limitan a meses de simulación debido a que la escala temporal de aplicación del XBeach es a corto plazo, aunque los tiempos se pueden reducir hasta cierto punto usando un factor de tiempo morfológico (Corbella & Stretch, 2012) pero sobreestima la variación morfológica al usarse en una escala temporal mayor. Adicionalmente, los datos disponibles en la costa Caribe también se limitaron a un par de meses.

El parámetro (s) coeficiente de propagación direccional necesita ser determinado en XBeach debido a sus efectos en el modelo morfológico Lanckriet et al, (2015). Con el fin de utilizar el mejor valor del parámetro de propagación se realizó una serie de ejecuciones para diferentes valores de propagación direccional que cambian de 1 a 1000, que son los valores mínimo y máximo definidos en el modelo. El mejor valor del parámetro de propagación se selecciona considerando que todos los sectores direccionales contengan confinada energía de las olas. En la Tabla 3-6 se muestran las modelaciones realizadas con los diferentes valores de (s) para una prueba de 5 días de simulación.

Tabla 3-6. Valores de propagación direccional usados en las simulaciones

N° de prueba	Valor de propagación direccional (s)
Caso 1	1
Caso 2	5
Caso 3	7
Caso 4	10
Caso 5	20
Caso 6	100
Caso 7	1000

3.4.1 Localización y batimetría

Los datos de batimetría fueron proporcionados por la universidad del Norte en el marco del proyecto denominado “PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE ZONAS COSTERAS EN LOS DEPARTAMENTOS DE LA GUAJIRA Y EL MAGDALENA (Diseño de proyectos pilotos y guía metodológica para la recuperación de playas)” que mediante una campaña de campo y utilizando una ecosonda de doble frecuencia (Odom Hydrotrac II.) con una alta resolución obtuvo la batimetría a lo largo de la costa en estudio. La variabilidad de la superficie del mar fue corregida usando un GPS diferencial (CHC X900 professional) ubicado juntamente con la ecosonda.

Los datos suministrados se utilizaron para generar entradas batimétricas para el modelo XBeach. Los datos alcanzaron una profundidad de aproximadamente -4.5m. Por debajo de los -5m de profundidad la variación morfológica es casi nula tanto en el modelo XBeach como en los datos obtenidos en campo debido a que están por fuera del perfil activo de la playa.

Kolokythas et al., (2016) investigó la sensibilidad de la distancia mínima entre los puntos de la malla (dx) y encontró que para el Sinterklaasstorm no hay una gran diferencia entre los valores de $dx = 0.5$, 1 o 2 y por lo tanto $dx = 2$ se utiliza como distancia mínima entre puntos de malla cercanos a línea de costa disminuyendo la resolución de la cuadrícula costa afuera (hasta un máximo de $dx = 5m$).

Para la modelación se utilizó una malla rectilínea (Figura 3-16) generada con el módulo RGFGGRID del software Delft3D. La malla estuvo compuesta por 193 filas y 97 columnas, con un área de celda promedio de $21,2 m^2$ y se utilizó dentro de los procesos de calibración y validación del modelo y las simulaciones finales de la investigación. La malla computacional cubrió un área de 450 m a lo largo de la costa por 1000 m de ancho. Sin embargo, para evitar distorsiones numéricas, la grilla se amplió 25 m en cada límite lateral. Con respecto a la distancia costa afuera, esta magnitud se determinó a partir de la profundidad de cierre teórica calculada con formulación propuesta por Birkemeier (1985). Ver Ecuación 2-6.

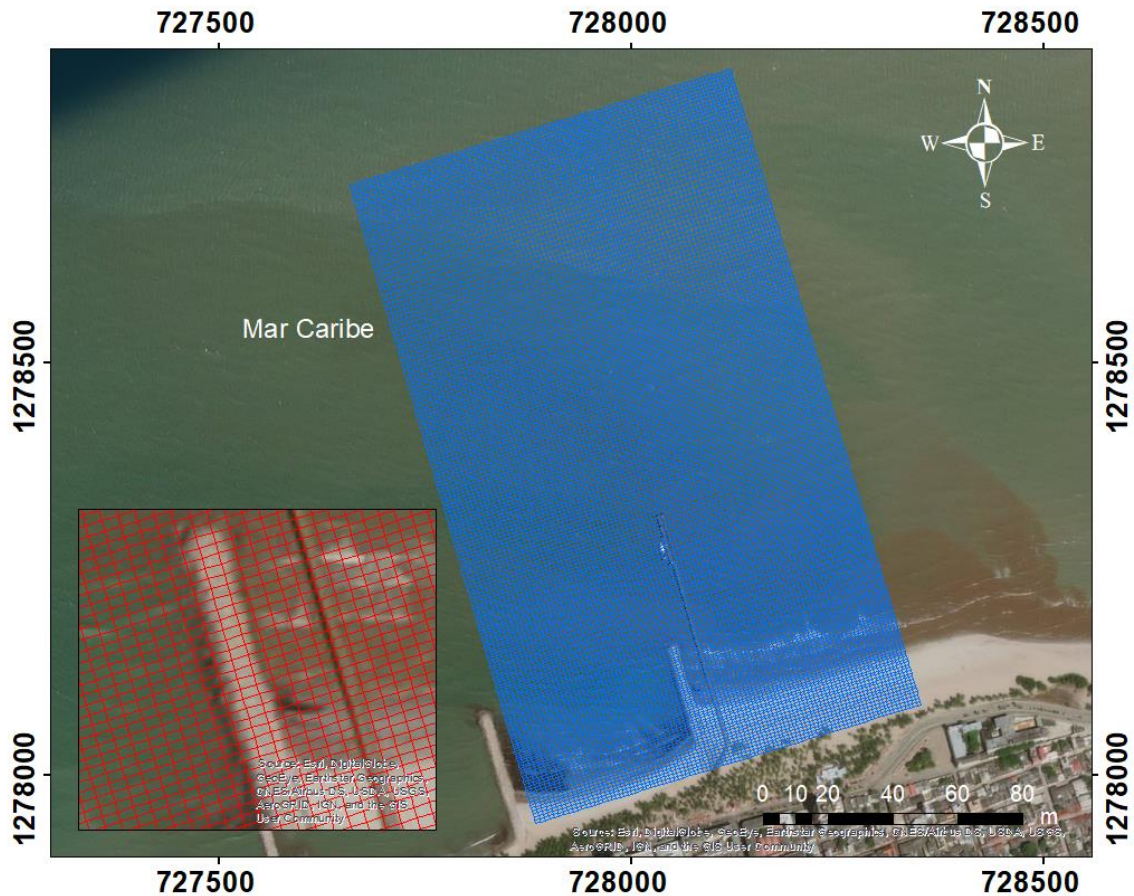
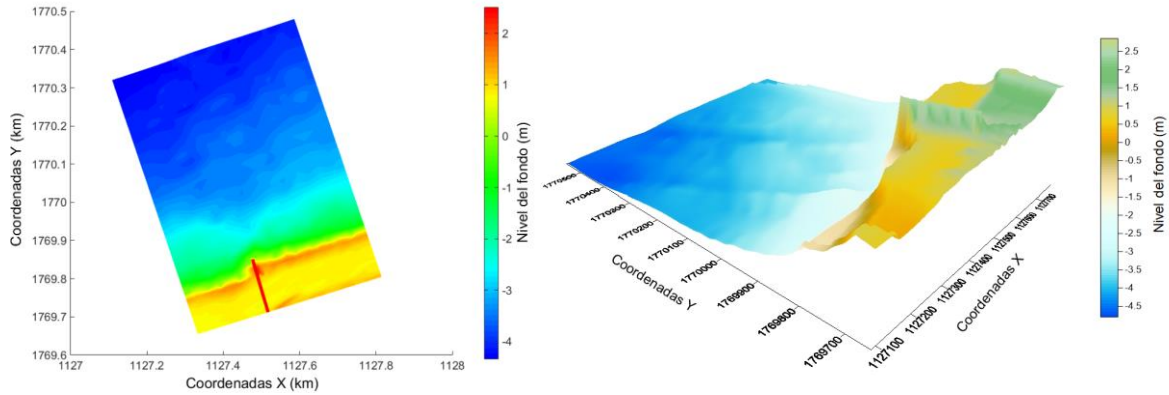
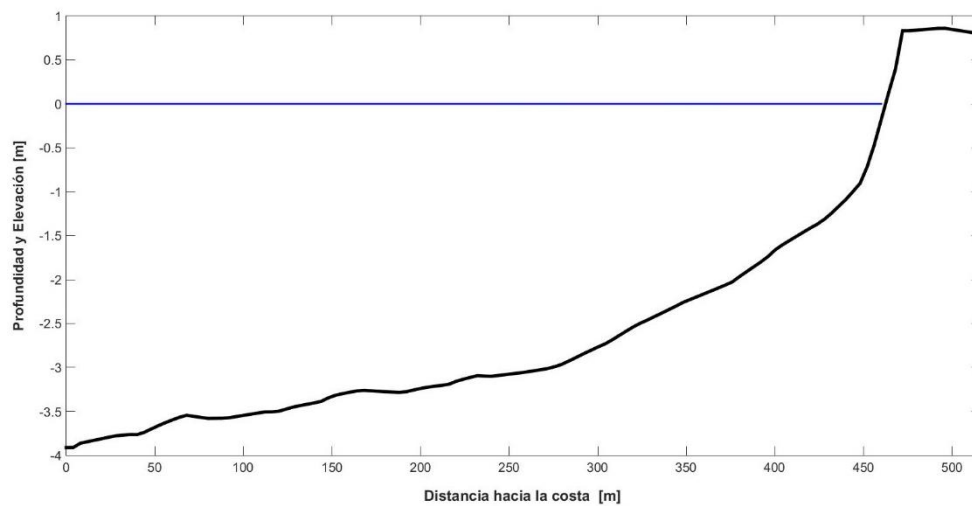


Figura 3-16. Mallado utilizado en la validación y simulaciones con XBeach

La profundidad para el desarrollo de las simulaciones en 2DH fue generada con la herramienta QUICKIN del modelo Delf3D (Figura 3-17a) y el transecto 80 se puede observar en la Figura 3-17b, generado mediante el software Matlab®. La profundidad del agua en la malla estaba limitada por la profundidad de cierre teórica alrededor de 4.1 m.



a) Batimetría 2D zona de estudio



b) Batimetría 1D del perfil de control

Figura 3-17. Batimetría inicial zona de estudio

3.4.2 Características del sedimento

La dirección y magnitud del transporte sedimentario depende en buena medida de las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos que forman la playa. Por tal razón es importante conocer las propiedades de los sedimentos para evaluar cualitativamente el potencial de transporte.

Una de las propiedades más importantes de los sedimentos es la granulometría, que es una clasificación de los sedimentos por su tamaño. También está la densidad, forma y la dureza. El tamaño del sedimento se suele definir a partir del tamaño medio de grano o D_{50} . De manera general, el D_n indica el tamaño de grano por el que pasa $n\%$ de masa. (Figura 3-18).

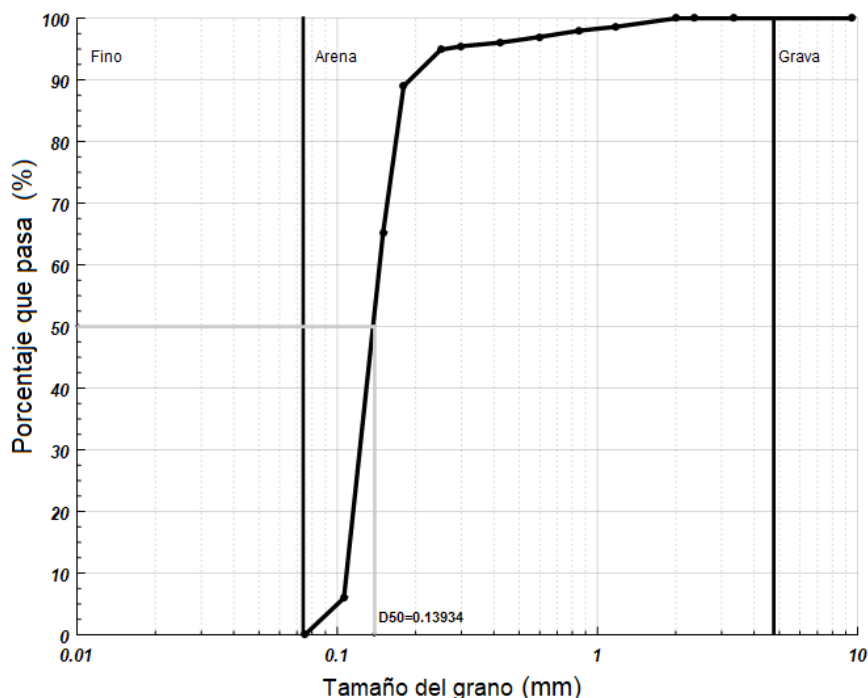


Figura 3-18. Curva granulométrica de la zona de interés. Riohacha- La Guajira.

Basado en las pruebas granulométricas y en la herramienta computacional SANDY© desarrollada en Matlab® por (Ruiz-Martínez, 2016) se obtuvieron los valores de D50 y D90 que fueron de 0.000139 m y 0.000183 m respectivamente y utilizados como datos de entrada en todas simulaciones realizadas con el modelo XBeach.

3.4.3 Dirección de la malla

La dirección de la onda (dirección de donde se originan las ondas) se puede especificar en dos tipos de coordenadas; en cartesianas (thetanaut = 0) y náutica (thetanaut = 1). Cuando se utiliza la convención náutica, las ondas se especifican con un ángulo con respecto al norte (0°) y en sentido horario (Este = 90°). El sistema de coordenadas cartesiano es relativo al eje x de la malla cálculo. Esto significa que para una cuadrícula con un eje x de Oeste a Este (de costa a costa) una onda con un ángulo de 0° es perpendicularmente entrante.

En las modelaciones realizadas se utilizaron coordenadas náuticas. XBeach necesita una entrada adicional para la rotación de la malla de cálculo. Esto es especificado por el parámetro Alfa (ángulo del eje computacional x relativo al Este y en sentido contrario a las agujas del reloj). Para las playas de Riohacha se utilizó un Alfa de 0° .

3.4.4 Condiciones de frontera de oleaje

El modelo XBeach tiene varias opciones para especificar la entrada del oleaje. En el presente estudio para el modo Surfbeat (incluye las ondas largas) se utiliza la opción jons, en la que se parametriza por defecto el espectro JONSWAP. El espectro necesita los parámetros especificados en la Tabla 3-7. En el caso del modo estacionario se utilizó la opción stat, la cual tiene en cuenta los parámetros enunciados en la Tabla 3-8. En la opción stat los parámetros de oleaje se definen en el mismo archivo de “params.txt” a diferencia de la opción jons que se debe definir en otro archivo txt.

Tabla 3-7. Parámetros necesarios cuando se utiliza la opción jons en XBeach

Parámetro	Unidad	Descripción
Hm0	(m)	Altura significativa de la ola
Tp	(s)	Periodo pico
mainang	(°)	Dirección de la ola
gammajsp	(-)	Factor de espectro JONSWAP
s	(-)	Esparcimiento de la ola
Duración	(-)	Duración de la cada condición especificada

Tabla 3-8. Parámetros necesarios cuando se utiliza la opción stat en XBeach

Parámetro	Unidad	Descripción
Hrms	(m)	Altura de ola media cuadrática
Trep	(s)	Periodo representativo
Dir0	(°)	Dirección media de la ola
M	(-)	Energía distribuida direccionalmente
Wavint	(s)	Intervalos de llamado entre módulos de ola

3.4.5 Condiciones de frontera de marea

En las condiciones de frontera de marea se utilizó la opción tideloc = 1, que significa que hay variación en el nivel del agua en los puntos de costa afuera del modelo. Por lo tanto, se imponen variaciones y corrientes de marea en las simulaciones. Para esto XBeach lee un archivo especificado con la palabra clave zs0file que contiene la serie de variación de superficie libre. Con esta opción seleccionada el registro de marea especificado se aplica en las cuatro esquinas del dominio e interpola a lo largo de los límites.

La longitud de las señales de marea está determinada por la palabra clave *tidelen*. Este es el número de niveles de agua especificados en el archivo referenciado con la palabra clave *zs0file*. La señal de marea será interpolada al paso de tiempo local de la simulación XBeach. Por lo tanto, la resolución de las señales sólo necesita ser suficiente para resolver el fenómeno de nivel de agua de interés.

3.4.6 Módulo de vegetación

En los últimos años se ha incrementado el interés por conocer el efecto que tiene la vegetación (manglar, pasto marino, etc) en los procesos que se presentan cerca de la costa. Según Van Rooijen et al., (2015) el modelo XBeach fue capaz de reproducir el efecto de amortiguamiento causado por la vegetación en las ondas cortas.

De acuerdo con Díaz et al., (2003) el pasto marino en el Caribe colombiano está ampliamente distribuido a lo largo de toda la costa continental en aguas muy someras hasta 14 metros de profundidad. En La Guajira, las praderas ocupan 34.674Ha., constituyendo el 80,3% del total de praderas existentes en el Caribe colombiano. Praderas mixtas de *Halodule wrightii*, *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme* bordean casi todo el litoral entre el Cabo de La Vela y Riohacha, entre menos de un metro y tres metros de profundidad. Díaz et al., (2003).

Teniendo en cuenta lo anterior, para el desarrollo de esta investigación se tiene presente el efecto del pasto marino en los procesos costeros llevados en la zona de estudio, en la Tabla 3-9 se muestran las características de la vegetación reportadas en las playas de Riohacha para que el modelo XBeach la tenga en cuenta en sus procesos físicos, las cuales deben estar en un archivo independiente y llamadas con la palabra clave *veggiefile*.

Tabla 3-9. Parámetros necesarios para modelación de la vegetación en XBeach

Parámetros	Valor	Descripción
nsec	1	Número de especies de vegetación
ah	0.5m	Altura de la sección de vegetación relativa al fondo
Cd	1	Coeficiente de resistencia
Bv	0.01m	Diámetro del vástago
N	20	Densidad de la vegetación

Los valores de la vegetación usados en las todas las modelaciones fueron seleccionados de acuerdo con la caracterización realizada por Diaz et al. (2003), quien reportó que en la zona de estudio predomina la pradera *Halodule wrightii* por tanto, se asigna el valor de 1 para el parámetro *nsec*; la vegetación encontrada

alcanza una altura de 0.5 m y corresponde al valor usado en el parámetro *ah*; el diámetro del vástago que es leído por XBeach mediante la palabra clave *Bv* es de 0,01 m y en cuanto a la densidad, se halló que es de 20 plantas por m² usada por modelo mediante la palabra *N*.

En la Figura 3-19 se observa la distribución de la vegetación de un transecto de la zona de interés y para que sea leído por XBeach debe indicarse en un archivo de texto similar a la batimetría y es llamado mediante la palabra clave *veggieimapfile*.

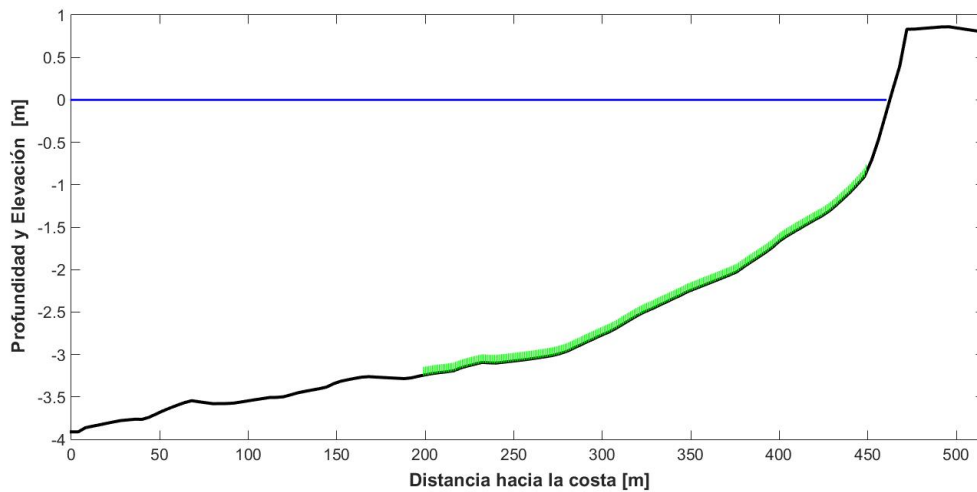


Figura 3-19. Perfil de control con vegetación

3.5 ESTUDIO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO

Contar con mediciones de campo tanto como sea posible es importante para alcanzar un buen modelado de los procesos de transporte de sedimentos y entender el cambio morfológico de una playa. En primera instancia el modelo se calibra para una serie de variables importantes de acuerdo con la literatura y se comparan los resultados del modelo con datos obtenidos en campo. En muchas ocasiones obtener suficientes datos de mediciones de campo para aplicación de modelos numéricos no siempre es posible y la cantidad de datos que se usan en el presente estudio son un poco limitados.

Con el fin de calibrar XBeach fue necesario investigar en la literatura los parámetros que tienen un efecto significativo en el modelo. Se encontró que en los estudios de Vousdoukas et al., (2011) y Bart, (2017), el modelo XBeach es sensible a los parámetros llamados *facua*, *wetslp* y *lws*. Utilizando la conclusión de este estudio, se realizaron extensas pruebas considerando las combinaciones de diferentes valores de estos parámetros. En la Tabla 3-10, se aprecian las descripciones de estos parámetros de XBeach y los respectivos valores usados en los diferentes casos de prueba.

Tabla 3-10. Valores de importantes parámetros en la calibración de XBeach

Parámetro	Descripción	Valor usado
Facua	Asimetría de transporte	0;0.5;1
Wetslp	Pendiente critica de avalancha bajo el agua	0.1;0.3;1
lws	Turbulencia de la onda larga	0;1

- **Facua**

El parámetro *facua* se utiliza para definir asimetría de onda. Cuando se define la asimetría de onda, las velocidades Eulerianas promediadas en profundidad transversal y a lo largo de la costa son reemplazadas por velocidades de advección del sedimento debido a asimetría. En caso de seleccionar cero como valor de *facua*, significa que no hay asimetría de onda; por otro lado, para los valores diferentes de cero, se define cierta asimetría en las ondas.

- **lws**

El parámetro *lws* se utiliza para incluir o excluir el efecto de ondas largas (oleaje). Por ejemplo, si el valor de *lws* se selecciona como cero, el efecto de la marea no se considera.

- **Wetslp**

Este parámetro es utilizado para describir la pendiente de avalanchas críticas hacia el mar. Para valores altos de este parámetro la pendiente hacia el mar se reduce, en cambio para valores pequeños este aumenta. En la Tabla 3-10 se aprecian los valores utilizados para los parámetros considerados importantes en la calibración del modelo. En el cual fue necesario realizar 18 modelaciones obtenidas a partir de diferentes combinaciones de los parámetros dados (ver Tabla 3-11) y fueron simulados durante el periodo definido en la sección 3-6 con el fin de determinar la sensibilidad del modelo a estos parámetros de entrada.

Tabla 3-11. Combinación de parámetros para determinar la sensibilidad del XBeach

N° caso	valores de los parámetros		
	facua	wetslp	lws
1	0	0.1	0
2	0	0.1	1
3	0	0.3	0
4	0	0.3	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	0.5	0.1	0
8	0.5	0.1	1
9	0.5	0.3	0
10	0.5	0.3	1
11	0.5	1	0
12	0.5	1	1
13	1	0.1	0
14	1	0.1	1
15	1	0.3	0
16	1	0.3	1
17	1	1	0
18	1	1	1

- **Sensibilidad del parámetro lwave**

Cuando se activa la opción lwave, es posible forzar ondas en las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas y las condiciones de frontera (Roelvink et al., 2015). Esto significa que los tensores de radiación como resultado de los gradientes en las tensiones de momento en el balance de acción de onda corta se utilizan como entrada para el NLSWE (mediante fuerzas inducidas por ondas). Lo anterior permite que las ondas de infragravedad, set-up y set-down sean incluidas en el modelo XBeach.

Es importante mencionar que la opción lwave tiene un efecto diferente en modo surfbeat que en el estacionario. En modo estacionario las ondas de infragravedad no existen porque la entrada de onda no puede causar gradientes en las tensiones de momento (la entrada de onda es estacionaria). Sin embargo, en modo estacionario la disipación y ruptura de onda que se resuelve en el balance de acción de onda corta se sigue utilizando como entrada para el NLSWE. Cuando se utiliza lwave = 0 se apaga la comunicación entre el NLSWE y el balance de acción de onda y por tanto la disipación de onda no da lugar a set-up o set-down. En la Tabla 3-12 se muestra los diferentes modelos que se ejecutan para determinar la sensibilidad del parámetro lwave.

Tabla 3-12. Modelos ejecutados para determinar la sensibilidad de lwave

Modo	lwave
Estacionario	Apagado
Estacionario	Encendido
Surfbeat	Apagado
Surfbeat	Encendido

3.5.1 Modelación 2D

Las ondas de Infragravedad se propagan de forma diferente a través de un modelo 2D que a través de un modelo 1D. Dado que el efecto de las ondas de infragravedad resulta ser muy significativo.

En cuanto al parámetro dtheta se estableció a 20 grados, dividiendo la celda direccional de la onda en 9 sectores direccionales. En las modelaciones 2D el η deja de ser cero (1D) con el fin de observar la influencia que tiene la oblicuidad del oleaje en el comportamiento de la evolución de un perfil, partiendo de la hipótesis de que la batimetría en la zona es muy compleja para ser representadas por un modelo en una dimensión y asimismo tener en cuenta los procesos de refracción.

3.5.2 Modelación modo estacionario y surfbeat

Las ondas de Infragravedad son muy importantes durante las tormentas por lo que deben ser calculadas en periodos con alturas de ola más significativas (con ondas de infragravedad más pronunciadas). Por otra parte, el modo estacionario se utiliza a menudo para simulaciones a largo plazo de climas relativamente tranquilos. La expectativa era que una combinación de surfbeat y modo estacionario pudiera simular el comportamiento de la evolución de un perfil en un periodo destructivo (erosión) y regenerativo (acreción).

Los tiempos empleados para validar las predicciones del modelo XBeach sobre el comportamiento de evolución del perfil en las playas de Riohacha en modo surfbeat y estacionario se muestran en la Tabla 3-13. Debido que la información de mediciones de campo se reduce a meses, se tomaron los primeros 90 días (3 meses) para validar el modo estacionario porque en este lapso no ocurrieron eventos meteorológicos extremos, es decir presenta un oleaje medio, y otro periodo con un intervalo de 5 días que representan el número de días que afectó el huracán Mathew con un oleaje más energético. Por lo tanto, la segunda parte (5 días) se validó el modo surfbeat.

En las condiciones de calma, las olas eran en su mayoría de 1 m de altura con un período de 3 segundos, mientras que las condiciones extremas durante el paso del huracán Mathew se definieron con una altura de olas de 2 m con un período máximo de 8 segundos. En todas las simulaciones numéricas realizadas se consideró estacionaria la propagación de ondas con el fin de optimizar el rendimiento computacional del modelo.

Tabla 3-13. Modelaciones desarrolladas en la validación

Nº	Tiempo de simulación	Modo XBeach
1	90 días	Estacionario
2	5 días	Surfbeat

3.6 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL MODELO

En este estudio se realizaron algunos ajustes de los parámetros por defecto del modelo para alcanzar una mayor exactitud en los resultados. Las predicciones del modelo se compararon con los levantamientos de perfiles de playa con el fin de evaluar y comparar la precisión relativa de los modelos en sus diferentes opciones hidrodinámicas (estacionario y surfbeat).

Debido a lo anterior se utilizaron métodos cualitativos y cuantitativos para hacer las comparaciones y los modelos serán evaluados principalmente sobre la base del siguiente criterio que deben tenerse en cuenta al leer los resultados.

La distancia desde el perfil predicho al perfil medido. Se utiliza una puntuación de habilidad de error cuadrático medio (MSESS), una raíz del error cuadrático medio (RMSE), considerando además que esta evaluación también se realizará cualitativamente (a simple vista).

- **Puntaje de habilidad de error cuadrático medio BSS**

Un método común para evaluar el rendimiento del modelo es una puntuación de habilidad. Según el glosario de meteorología (2016) la definición de habilidad es una evaluación estadística de la exactitud de los pronósticos o la efectividad de las técnicas de detección. La puntuación de habilidad que se utiliza comúnmente en la comparación de los cambios en el nivel del fondo en los estudios de ingeniería costera es el Brier Skill Score (BSS) representada por la Ecuación 3-1.

$$BSS = 1 - \frac{\langle |z_p - z_m|^2 \rangle}{\langle |z_i - z_m|^2 \rangle} \quad 3-1$$

En donde z_p es el perfil predicho, z_m es el perfil medido en campo y z_i representa el perfil inicial.

El puntaje de habilidad de error cuadrático medio (BSS) representa lo bien que el modelo predice la batimetría en comparación con la batimetría medida en campo. Si la predicción del modelo es igual al perfil inicial (no ocurre nada según el modelo), la puntuación de habilidad es 0. Si la predicción para un momento determinado es igual a la medida en ese momento, la habilidad del modelo es perfecta y la puntuación es 1. Cuando la predicción del modelo es peor que el perfil inicial, la puntuación se vuelve negativa. En la Tabla 3-14 se muestra la clasificación dada para el BSS por van Rijn et al., (2003).

Tabla 3-14. Clasificación del BBS según Van Rijn et al. (2003).

Puntaje	Clasificación
<0	mala
0.0-0.3	Pobre
0.3-0.6	Razonable
0.6-0.8	Buena
0.8-1.0	Excelente

- **Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)**

La raíz del error cuadrático medio o RMSE (Root Mean Squared Error) de un estimador mide la raíz del promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. El RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud y está dado por la Ecuación 3-2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_p - z_m)^2} \quad 3-2$$

3.7 ESCENARIOS ACTUALES MODELADOS

En esta sección se presentan los escenarios a modelar con las condiciones actuales de la zona de estudio. Como se ha mencionado anteriormente el objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento de la evolución del perfil ante variaciones climáticas del caribe colombiano. Por tanto, se realizarán modelaciones en 2DH para eventos extremos y oleaje moderado, de tal forma que se pueda cumplir los objetivos del estudio. En el primer caso, se llevarán simulaciones en modo surfbeat del modelo XBeach con un intervalo de duración de 5 días, periodo utilizado en la calibración del modelo, así como también las condiciones de oleaje caracterizados en el clima marítimo de $H_s=2$ m y $T_p=8$ s con una dirección predominante del NE para eventos extremos.

En cuanto a las simulaciones a largo plazo se utilizó el modo estacionario del modelo XBeach para unas condiciones de oleaje moderado con un $H_s=1$ m y $T_p=3$ s y dirección predominante del NE, el intervalo de simulación fue de 90 días, igual al periodo de calibración en este modo, y debido a que el tiempo máximo de simulación del modelo es aproximadamente 11,5 días equivalentes a 1 millón de segundos fue necesario utilizar un Morfac de 10.

3.8 SISTEMAS DE PROTECCIÓN PROPUESTOS MODELADOS

Se seleccionaron seis esquemas de protección costera para identificar y analizar el efecto de las diferentes configuraciones en la evolución del perfil y a su vez éste en los procesos de erosión costera a corto y mediano plazo. El primer esquema para modelar fue el alimento en la playa sumergida (barra sumergida artificial) con un alto y ancho de 1 y 30 m respectivamente localizadas a diferentes profundidades. Posteriormente se propusieron un conjunto de espolones con diferentes formas, rompeolas ubicados a una distancia determinada del margen costero; por último, se incluyeron obras de abrigo con distintas configuraciones.

Por otro lado, los esquemas de soluciones costeras se dividieron en alternativas de ingeniería suave, definidas como aquellas que pueden ser removidas en caso de presentar resultados adversos sin ocasionar daños al ecosistema; e ingenierías duras, conocidas como aquellas que contemplan la construcción de estructuras resistentes, y clasificadas de acuerdo con la posición relativa en que se encuentra con respecto a la línea de costa. Los esquemas de protección costera que se estudiaron se detallan a continuación.

- **Ingeniería blanda**

Como infraestructura verde se utilizó un relleno artificial en la playa sumergida. Las características de la barra sumergida diseñada para el estudio se evidencian en la Figura 3-20; con el fin de conocer el comportamiento en los procesos erosivos se simuló en diferentes profundidades.



Figura 3-20. Perfil de playa con la barra sumergida artificial

- **Ingeniería dura**

En esta investigación se utilizaron las principales estructuras de este tipo, como los espolones lineales (Figura 3-21), rompeolas (Figura 3-22), espolones con forma de T (Figura 3-23) y obras de abrigo (Figura 3-24 y Figura 3-25). Se eligió una separación longitudinal mayor a 50 m para cumplir con los criterios recomendados por la (USACE, 1992), y se estableció una distancia de 100 m entre las estructuras para observar la influencia de la acumulación de sedimentos generadas en el sotavento de las estructuras perpendiculares. Las ramas de los espolones T fueron de 15 m con una longitud de 40 m.

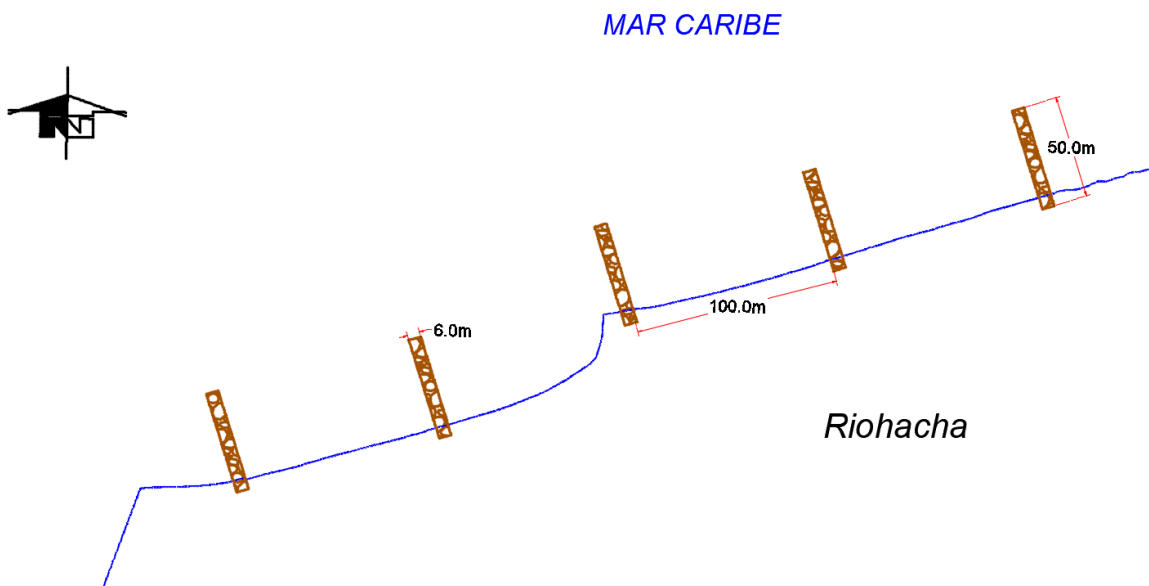


Figura 3-21. Configuración de espolones lineales

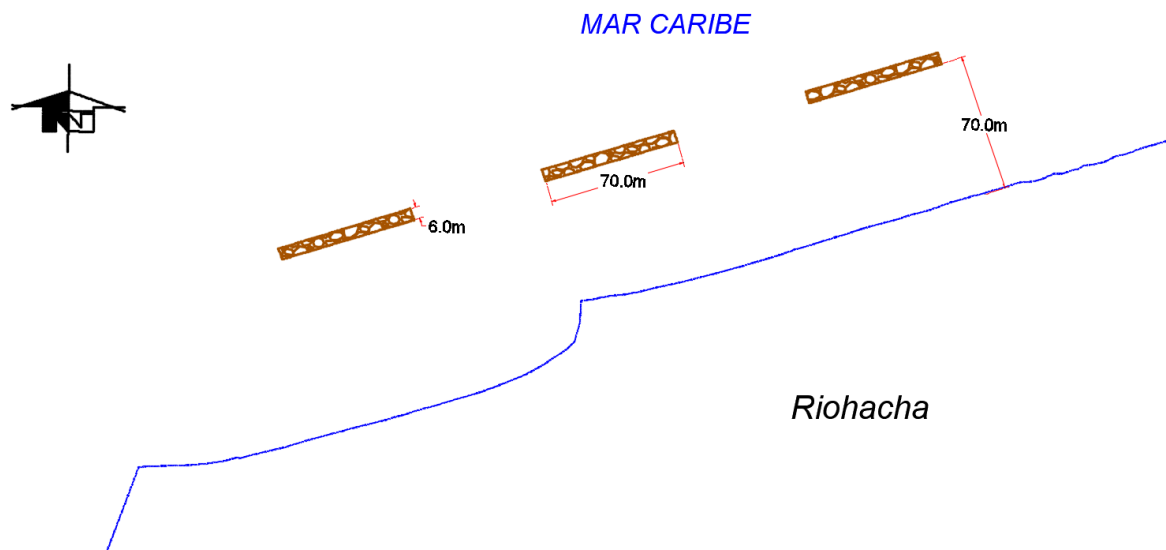


Figura 3-22. Configuración de rompeolas I

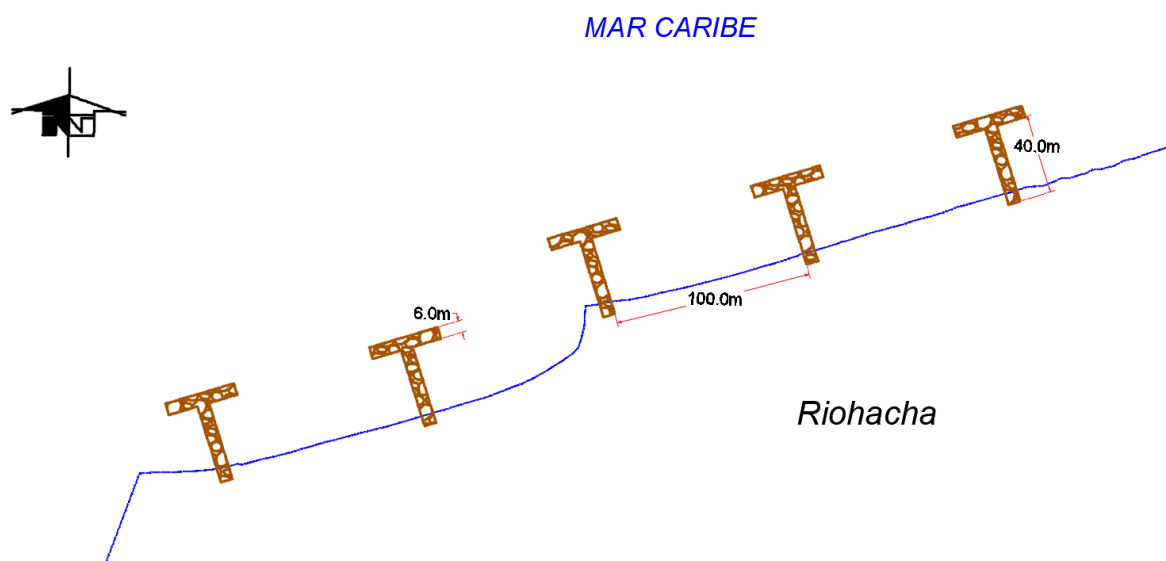


Figura 3-23. Configuración de espolones con forma de T

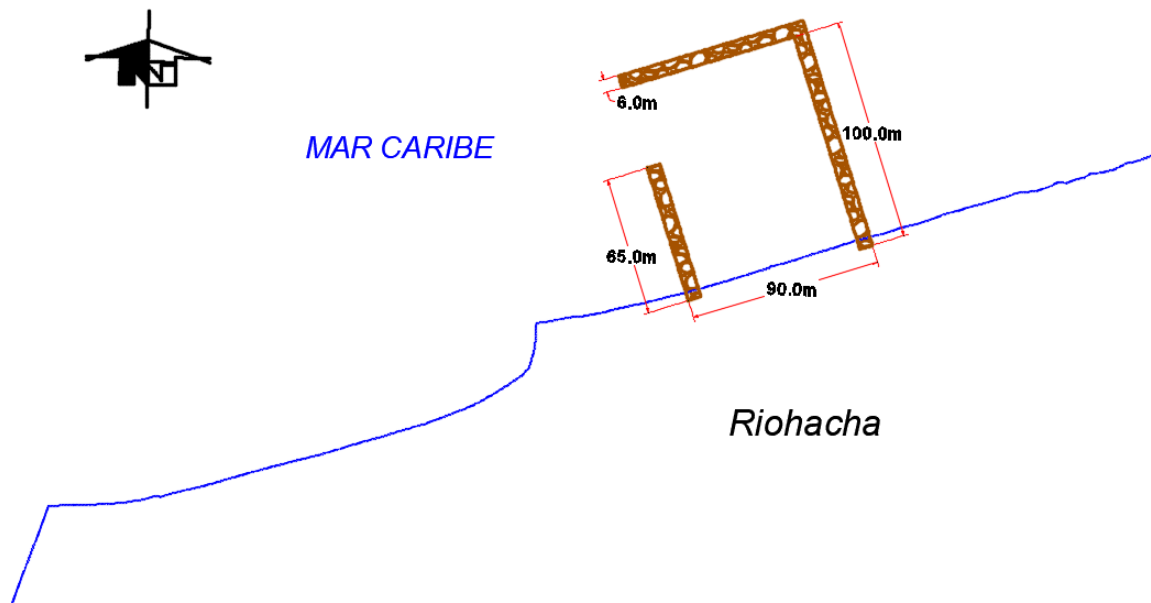


Figura 3-24. Configuración de obras de abrigo

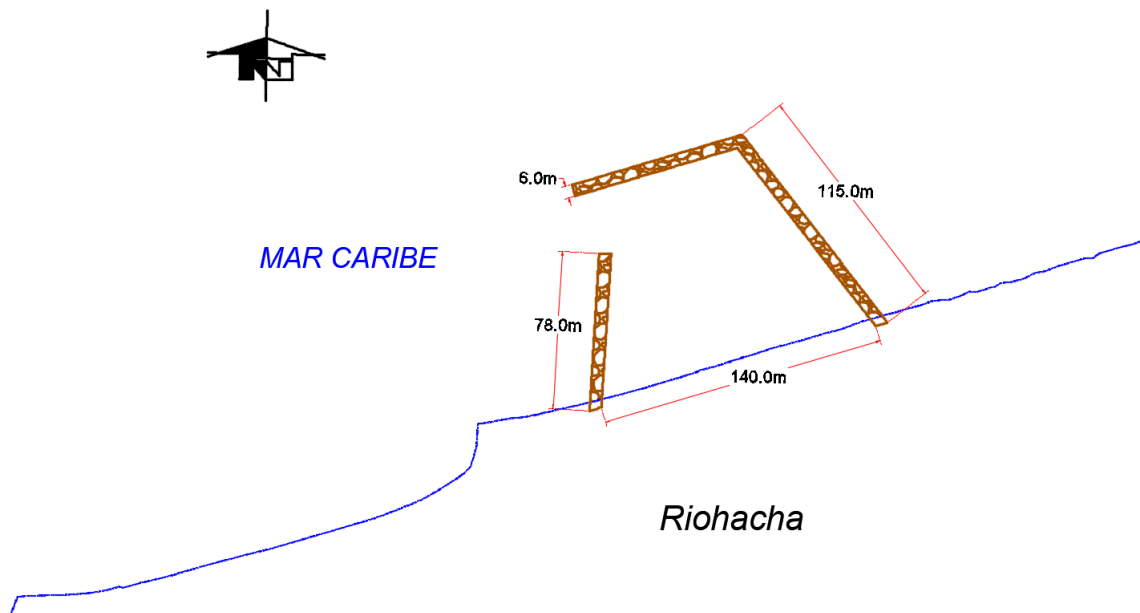


Figura 3-25. Inclinación de obras de abrigo

En la Tabla 3-15 se presenta un resumen de las simulaciones realizadas, se hace la salvedad que debido a que el modelo sobrestimó la acreción durante la modelación con las estructuras existentes en modo estacionario, para los escenarios hipotéticos se realizaron simulaciones solo para el modo surfbeat con

las condiciones de oleaje extremo de la zona de estudio durante un periodo de 5 días.

Tabla 3-15. Resumen de simulaciones a soluciones propuestas

Escenario	Configuración	Corto plazo Surfbeat
1	Esquema de barra sumergida artificial a diferentes profundidades (2.5, 3 y 3.5m)	
2	Esquema de espolones lineales	
3	Esquema de espolones con forma de T	
4	Esquema de rompeolas	Condiciones de oleaje. Hs =2m; Tp=8s; Dir.=30°
5	Esquema de obra de abrigo en forma recta	
6	Esquema de obra de abrigo inclinada	

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en esta investigación. Por tanto, se detallan los objetivos alcanzados en este estudio con la siguiente secuencia:

En la sección 4.1 se muestran los casos de calibración y validación realizados en el análisis de sensibilidad para las opciones hidrodinámicas estacionario y surfbeat con sus respectivos análisis.

En la sección 4.2 se presenta los resultados de las modelaciones y los análisis realizados a escala de tormentas y mediano plazo para las condiciones actuales de la zona de estudio.

Por último, en la sección 4.3 se detallan los resultados obtenidos para cada una de las configuraciones de soluciones protección costera propuestos para la zona de estudio e impactos en el comportamiento de la evolución del perfil de playa.

4.1 CASOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las diferentes modelaciones realizadas con el objetivo de calibrar y validar el modelo XBeach para la hidrodinámica local de las playas de Riohacha. En primera instancia se determinó el efecto del parámetro de propagación direccional para el modo hidrodinámico surfbeat ya que en modo estacionario no es un parámetro de entrada.

- **Sensibilidad al parámetro coeficiente de propagación direccional s**

En la presente investigación se realizaron modelaciones en 2D, es decir que el modelo XBeach incluyen la dimensión a lo largo de playa y no solo el perfil transversal, por tanto, es fundamental validar el modelo frente a dicho escenario (de forma controlada) ya que en este caso, un fenómeno adicional es la propagación direccional que se convierte en un factor muy importante debido a su influencia en el cambio morfológico (Daly, 2009).

En el desarrollo de estas simulaciones solo se modificó el parámetro s , dejando las demás variables por defecto. Para ello se utilizó un periodo de 5 días con un H_s de 2 m, T_p de 8 s y una dirección predominante del Noreste. En la Figura 4-1 se

presentan los resultados obtenidos para diferentes valores de s y su influencia en los perfiles de playa.

Con el fin de comparar los resultados, en la Figura 4-1 se observan los perfiles de playa medidos tras el paso del fenómeno natural de bajas presiones (huracán Mathew) representada con la línea azul suspendida y los perfiles modelados con XBeach para diferentes valores de s están dados por la línea roja y el perfil inicial medido en oleaje moderado (octubre del 2016) está indicado con la línea negra, asimismo se presentan los puntajes de habilidad del error cuadrático medio del modelo al predecir el comportamiento de la playa.

El coeficiente de propagación direccional s que permite identificar como se distribuye la energía en cada uno de los sectores direccionales en los que se divide la propagación del oleaje (con base al θ_{amin} , θ_{amax} y θ utilizados). Según Roelvink et al. (2009) y las diferentes simulaciones, al aumentar el parámetro s la concentración de la densidad de energía se reduce a un menor número de sectores direccionales y de acuerdo con Roelvink et al. (2017) que recomienda tener en cuenta los efectos de la propagación direccional y la incidencia oblicua para evitar una sobreestimación del run-up, se determinó la influencia de la acumulación de energía en la predicción de la evolución morfológica del perfil de playas.

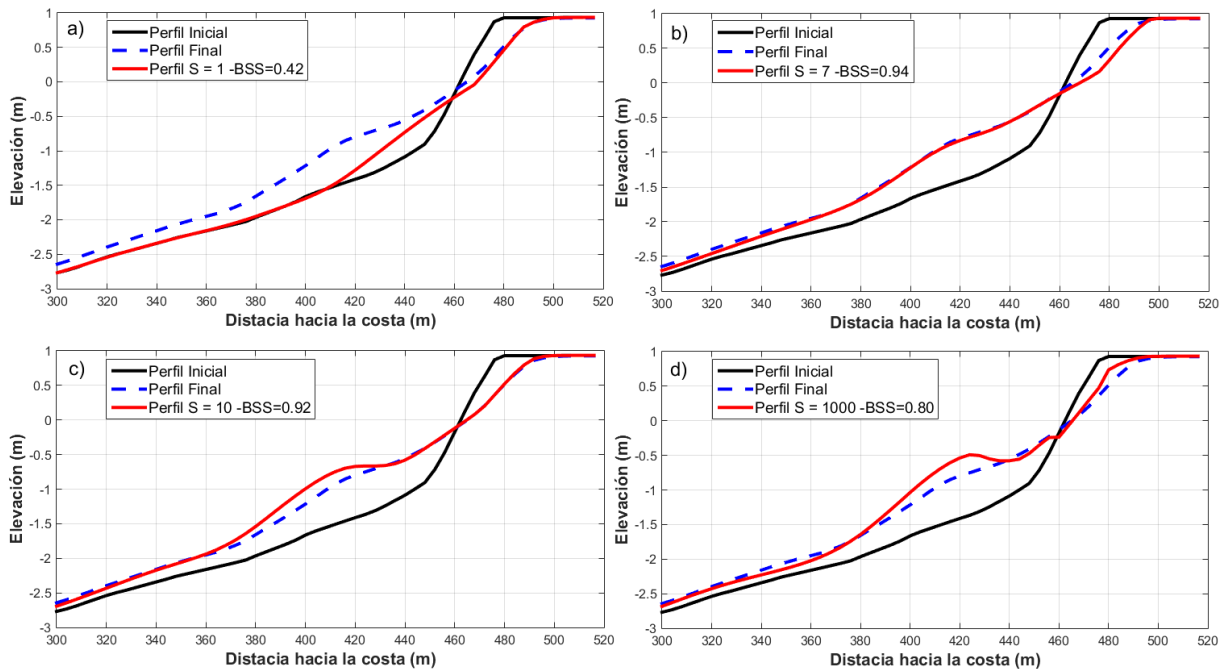


Figura 4-1. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio para la variación del parámetro s .

a) $s=1$. b) $s=7$. c) $s=10$. d) $s=1000$.

El mejor BSS y menor RMSE se obtuvo para cuando el parámetro s tiene un valor de 7 con 0.94 y 0.078 respectivamente (Figura 4-1b), en cambio para un valor de $s=1$ el modelo alcanza valores de 0.43 y 0.24 de BSS y RMSE respectivamente y obteniendo una predicción regular según la clasificación de Van Rijn et al. 2003 (Figura 4-1a). Aunque se muestra como tiene una buena aproximación a la realidad en la erosión de la playa seca y llegando al punto en que el modelo no realiza ninguna variación del fondo marino. Resultados similares reportó Van Thiel de Vries et al. (2008) en las simulaciones sin propagación direccional, siendo el intercambio de sedimentos en la costa cero (como lo esperaban), mientras que en la simulación con propagación direccional observan cierta interacción en la costa entre transectos transversales.

En cambio con un coeficiente de propagación direccional mayor (Figura 4-1c) se muestra como el modelo alcanza un BSS de 0.92 para un valor del parámetro s de 10, que es valor por defecto de XBeach y se observa la capacidad del modelo para predecir la erosión casi perfecta de la duna, mostrando la pérdida y ganancia de sedimento en el transecto transversal, que es una buena estimación para el intercambio de sedimentos en la costa, sin embargo presenta una sobreestimación de la barra sumergida en 0.3 m de alto a lo largo de 60 m aproximadamente.

Por otra parte, de acuerdo a la comparación de la Figura 4-2b ($s=7$) y Figura 4-2c ($s=10$) se observa que no hay reducción en la variación de la energía de onda larga en la Figura 4-2b y teniendo en cuenta la Figura 4-1b se aprecia como el modelo para un ($s=7$) alcanza una mejor predicción de la evolución del perfil de playa, obteniendo un BSS y un RMSE de 0.94 y 0.7 respectivamente, sobre todo representa con mayor precisión el comportamiento de la barra de arena (zona de interés en la investigación), aunque sobrestima la erosión de la playa seca en 0.2 m de alto y 20 m de longitud transversal a línea de costa.

En cuanto a las simulaciones del coeficiente de propagación direccional igual a 1000 (Figura 4-1d) permite que la densidad de energía se concentre en un solo sector direccional y que la agrupación de las ondas cortas entrantes se reduzca, dando como resultado una disminución de por lo menos el 40% en la variación de onda larga (Figura 4-2d) y en consecuencia un 35% menos de erosión en las dunas por encima del nivel de la marea de tormenta como es observado en la Figura 4-1d, es por tal razón, que el impacto de la tormenta es sustancialmente menor (tanto el retroceso de la cresta, como la erosión de dunas) con respecto a simulaciones que presentan valores de coeficiente de propagación direccional pequeño. Adicionalmente, a simple vista se observa que no representa muy bien la evolución del perfil de playa por la sobreestimación en la acumulación de la barra sumergida y subestima la erosión de la duna, pero según el BSS, parámetro recomendado por

Roelvink et al. (2009) para determinar la habilidad del modelo es de 0.80 y de acuerdo con la clasificación de Van Rijn et al. (2003) es un modelo excelente.

Debido a lo anterior se recomienda un valor de $s = 7$ para todas las ejecuciones del modelo ya que presenta una mejor distribución de la energía en cada uno de los sectores direccionales, asimismo no hay reducción en la variación de la energía de onda larga al comparar con el valor por defecto ($s=10$) y, por último, alcanza una mejor predicción de la evolución de los perfiles de playa en comparación a los demás valores utilizados, aunque está cerca del valor por defecto de XBeach ($s = 10$). Adicionalmente, dicho valor también es recomendado por Goda, (2010), Bart, (2017) para las ondas generadas por el viento.

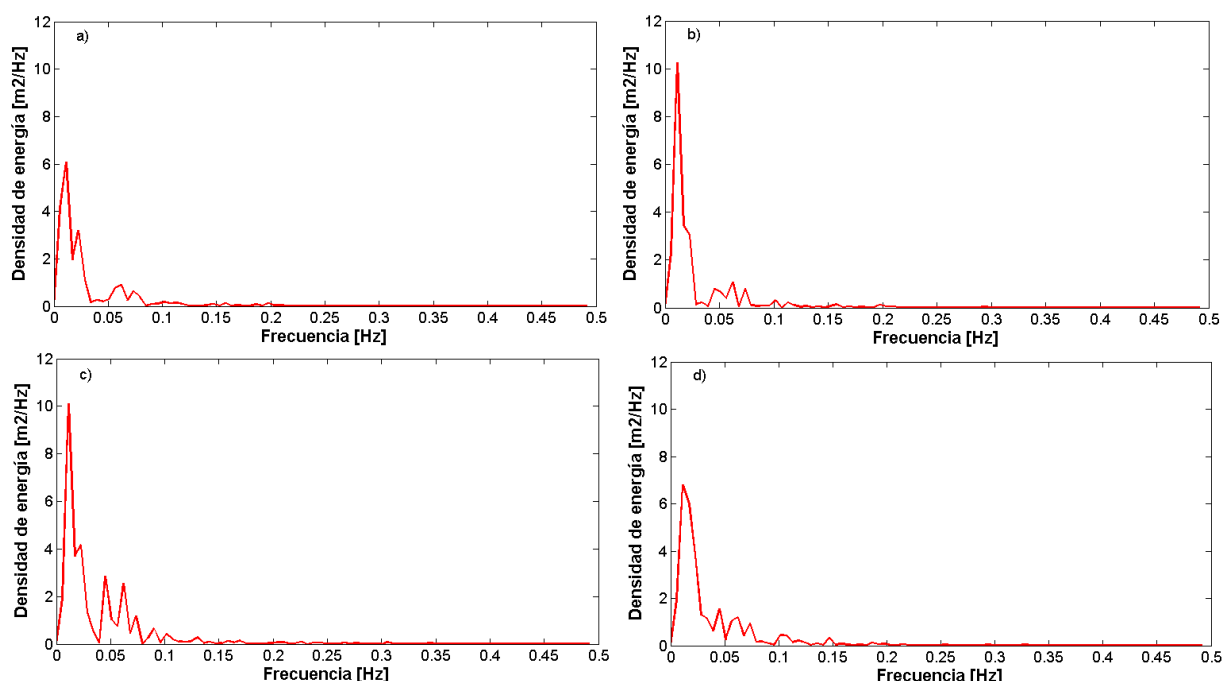


Figura 4-2. Espectro de energía para diferentes valores del coeficiente de propagación direccional.
a) $s = 1$. b) $s = 7$. c) $s = 10$. d) $s = 1000$.

Continuando con la presentación del análisis de sensibilidad se muestra a continuación para los dos modos hidrodinámicos (estacionario y surfbeat) usados en esta investigación los parámetros de mucha influencia en la calibración y respectiva validación del modelo.

- **Modo estacionario**

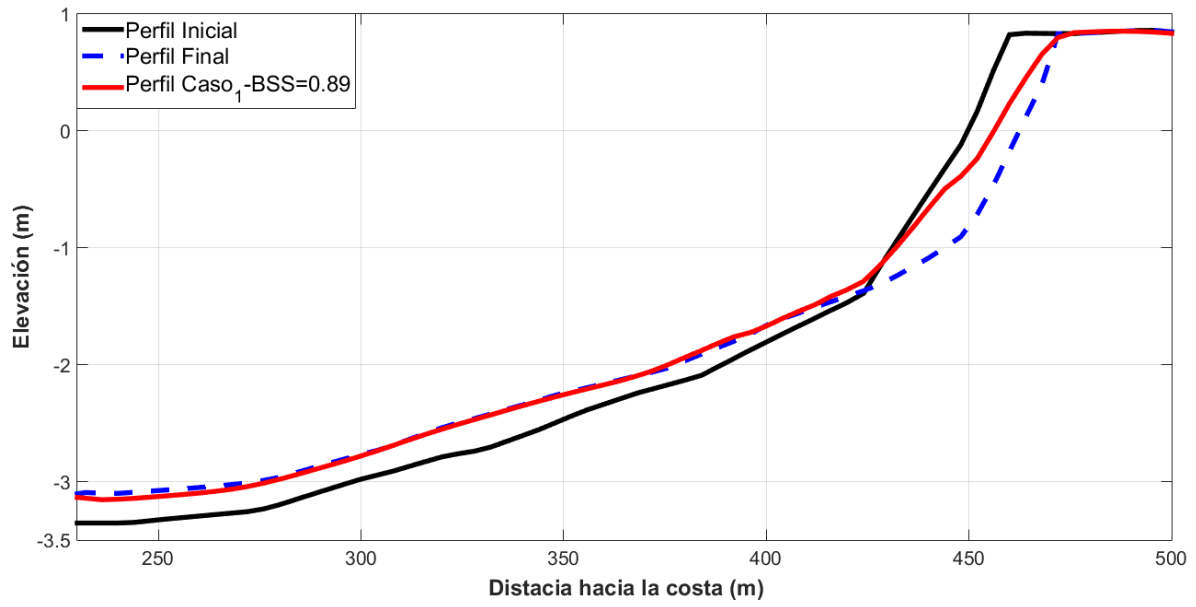
Cabe recordar que este modo hidrodinámico no tiene en cuenta las ondas infragravitatorias, principalmente se usa para condiciones de oleaje moderado. Luego de realizar las simulaciones a las diferentes configuraciones de los

parámetros sensibles del modelo XBeach, se presenta en la Tabla 4-1 el resumen de los casos con su respectivo error medio cuadrático RMSE y el puntaje de habilidad cuadrático medio BSS con la clasificación dada por Van Rijn et al. (2003).
Tabla 4-1. Resumen de análisis de sensibilidad para validación del modelo estacionario

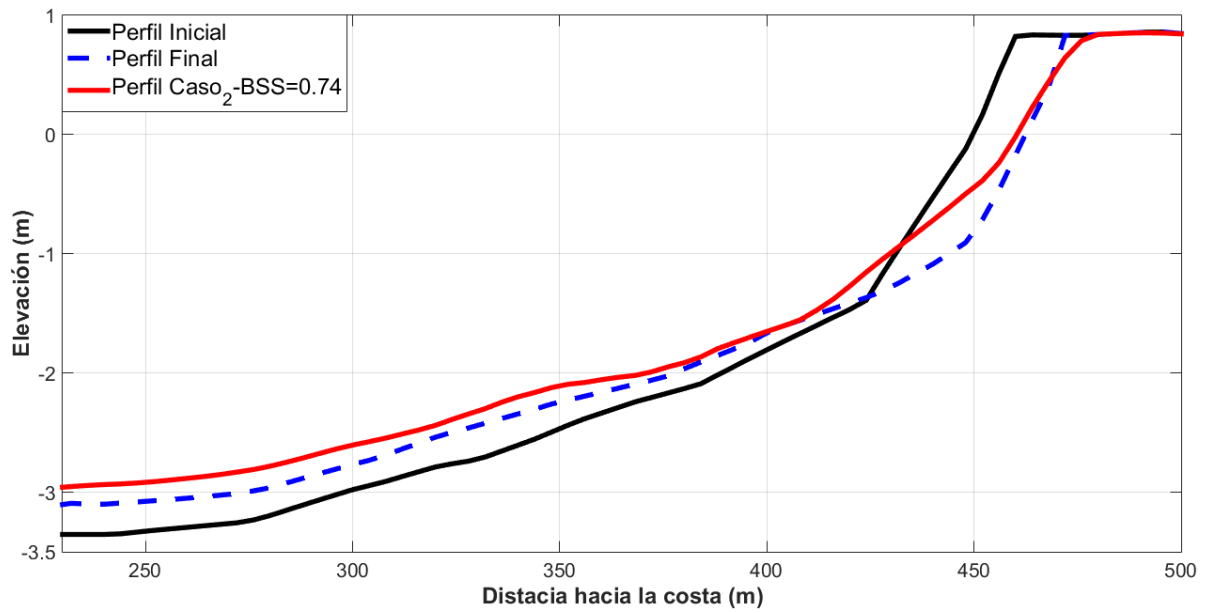
Nº CASO	RMSE	BSS	CLASIFICACIÓN
1	0.10	0.89	Excelente
2	0.16	0.74	Bueno
3	0.16	0.73	Bueno
4	0.10	0.89	Excelente
5	0.24	0.45	Razonable
6	0.23	0.44	Razonable
7	0.18	0.68	Bueno
8	0.17	0.65	Bueno
9	0.21	0.55	Razonable
10	0.22	0.52	Razonable
11	0.26	0.4	Razonable
12	0.27	0.41	Razonable
13	0.18	0.69	Bueno
14	0.17	0.67	Bueno
15	0.29	0.35	Razonable
16	0.28	0.38	Razonable
17	0.32	0.25	Pobre
18	0.34	0.2	Pobre

De acuerdo con los resultados de las simulaciones realizadas para la calibración del modelo y contrastando con las mediciones de perfiles levantados durante condiciones de oleaje medio (octubre 2016) se presenta en la Figura 4-3 las configuraciones y ajuste de parámetros sensibles del XBeach con los mayores puntajes de habilidad del error cuadrático medio BBS y el menor RMSE, es decir, se resumen los modelos con la mayor aproximación a la realidad.

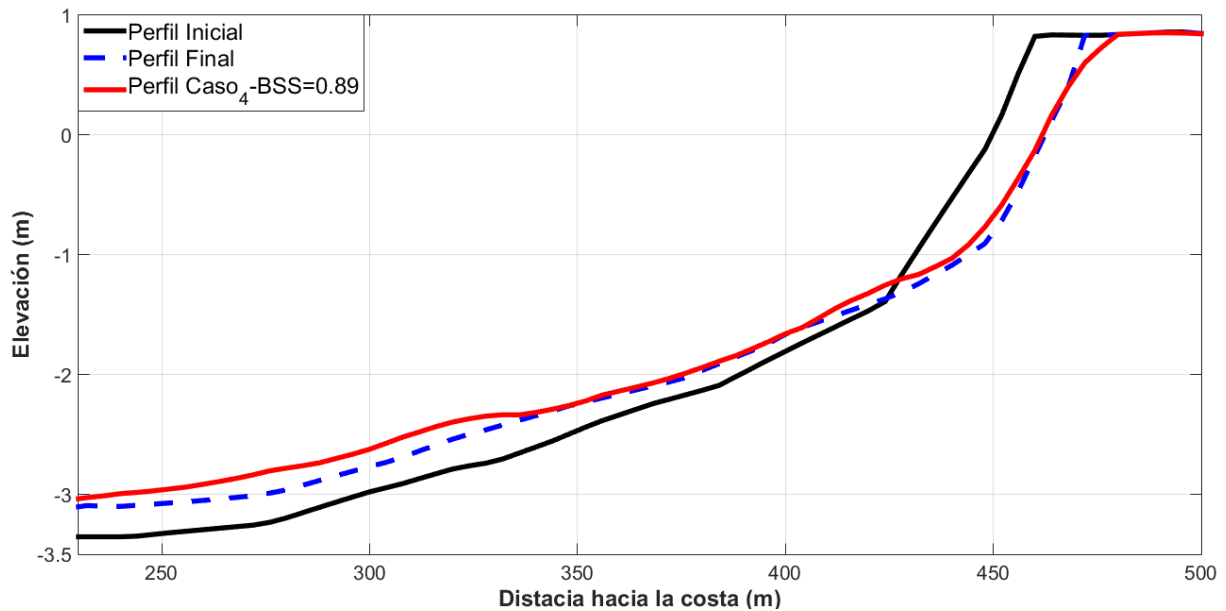
La Figura 4-3 presenta la evolución del perfil de playa en modo estacionario, donde la línea negra indica el perfil inicial medido en oleaje moderado (julio del 2016), la línea suspendida azul representa el perfil final medido en oleaje moderado (octubre del 2016) y el perfil modelado con XBeach para cada una de las configuraciones está dado por línea roja.



a) Perfil de control configuración caso 1



b) Perfil de control configuración caso 2



c) Perfil de control configuración caso 4

Figura 4-3. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio del modelo estacionario

De la Tabla 4-1 se observa como el caso 1 y 4 (ver sección 3.5) presentan los mayores puntajes de habilidad BSS y menores RMSE de 0.89 y 0.10 respectivamente, y analizando los parámetros sensibles del modelo se muestra como para diferentes valores de *facua*, un parámetro relacionado con la asimetría del oleaje, permite obtener resultados que representan un indicador que describe su sensibilidad debido a que alcanzan valores cercanos a 1. Por ejemplo, comparando los casos 1 y 15 donde solo variamos el parámetro *facua* se aprecia tener un BSS de 0,89 a 0,35 es decir de ser un excelente a un modelo razonable según la clasificación de Van Rijn et al. (2003). Adicionalmente, basado en la comparación de los casos 1 y 15 se observa un aumento significativo de acreción en la línea de costa cuando el parámetro *facua* se incrementa.

Trouw et al., (2012) afirma que la asimetría de las olas puede ser importante en el transporte de sedimentos a través de la costa y no debe omitirse debido a que la no linealidad de las olas (asimetría en la zona surf) y el flujo de retorno son los dominantes del proceso de transporte cerca de la costa (Ruessink et al. 2007). De acuerdo con la literatura y los resultados obtenidos en el estudio de calibración, se entiende que la asimetría de las olas desempeña un papel importante en la región media de La Guajira; por lo tanto, su efecto debe incluirse, es decir, que el valor de *facua* no debería ser cero, sin embargo, los mejores resultados de predicción del modelo en modo estacionario se obtuvieron para cuando el valor de *facua* fue cero.

Adicionalmente se observa, como a medida que el valor del parámetro *facua* se reduce, la pendiente de la playa también se ve afectada por este cambio. Por tanto, el valor del parámetro *wetslp*, relacionado con la pendiente crítica bajo el agua debe ser cambiado, presentando los mejores resultados cuando es cercano a 0.

La variabilidad de los resultados derivados del modelo XBeach en modo estacionario es considerable. Según Trouw et al. (2012) las ondas largas no se deben apagar ya que los tensores de radiación parecen calcularse en ese módulo, aunque sean generadas por ondas cortas.

- **Modo surfbeat**

A diferencia del modo anterior, surfbeat tiene en cuenta las ondas infragravitatorias, y principalmente se usa para condiciones de oleaje extremos. Luego de realizar las mismas simulaciones de sensibilidad que al caso anterior y contrastar con los levantamientos de perfiles realizados para las condiciones de oleaje extremo en noviembre del 2016 tras el paso del huracán Mathew, se resumen en la Tabla 4-2 los valores de RMSE y BSS con su respectiva clasificación.

Tabla 4-2. Resumen de análisis de sensibilidad para validación del modelo surfbeat

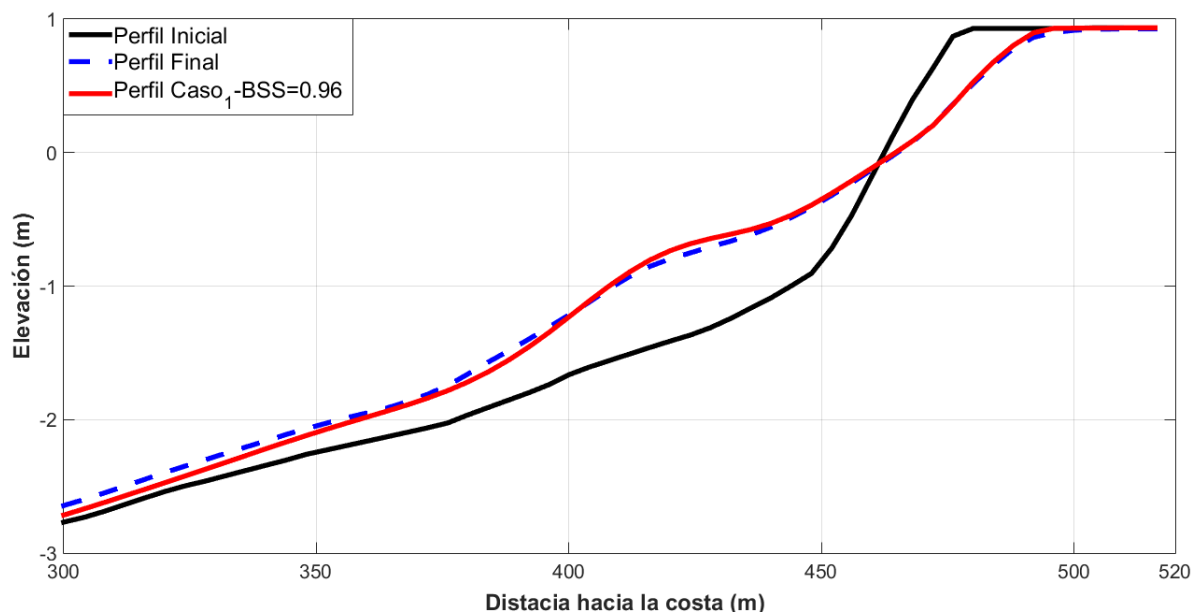
N° CASO	RMSE	BSS	CLASIFICACIÓN
1	0.05	0.96	Excelente
2	0.06	0.96	Excelente
3	0.11	0.87	Excelente
4	0.07	0.94	Excelente
5	0.18	0.62	Bueno
6	0.17	0.63	Bueno
7	0.25	0.38	Razonable
8	0.24	0.42	Razonable
9	0.24	0.43	Razonable
10	0.23	0.43	Razonable
11	0.29	0.32	Razonable
12	0.28	0.33	Razonable
13	0.2	0.42	Razonable
14	0.21	0.41	Razonable
15	0.24	0.4	Razonable
16	0.27	0.36	Razonable
17	0.29	0.3	Razonable
18	0.3	0.25	Pobre

En la validación del modelo en modo surfbeat se utilizaron los perfiles de playas medidos bajo condiciones climáticas extremas tras el paso del huracán Mathew

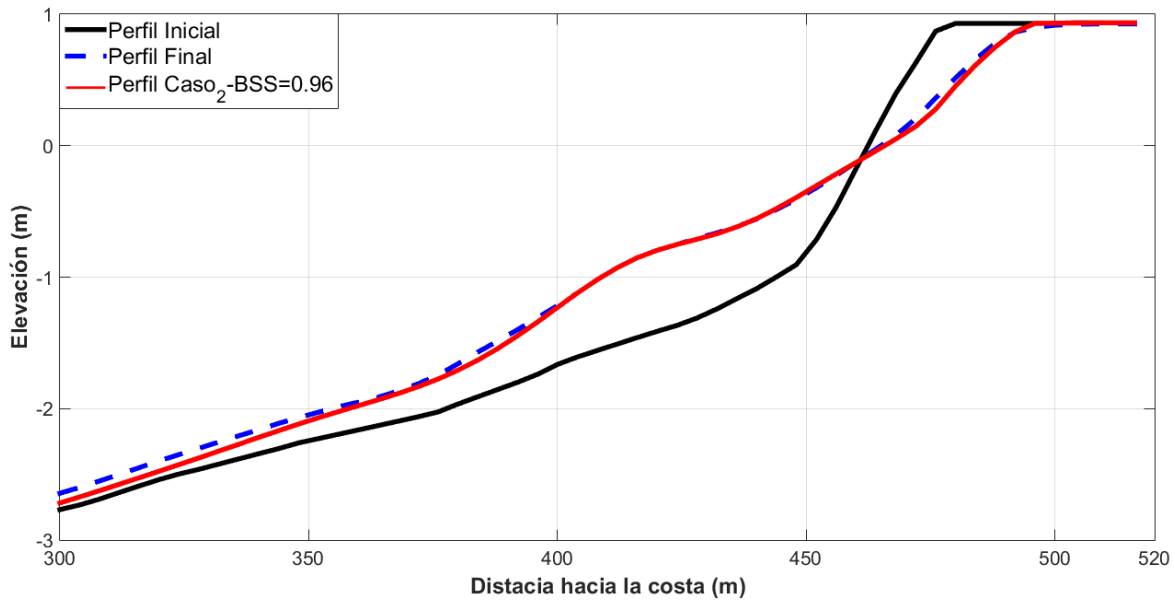
en noviembre del 2016; resumiendo en la Figura 4-4 los perfiles medidos y modelados que presentan las configuraciones con los mayores puntajes de habilidad cuadrático medio y el menor RMSE.

En la Figura 4-4 se presenta la evolución del perfil de playa en modo surfbeat, siendo la línea negra el perfil inicial medido en oleaje moderado (octubre del 2016), la línea suspendida azul representa el perfil final medido en oleaje extremo (noviembre del 2016) y el perfil modelado con XBeach para cada una de las configuraciones está dado por línea roja

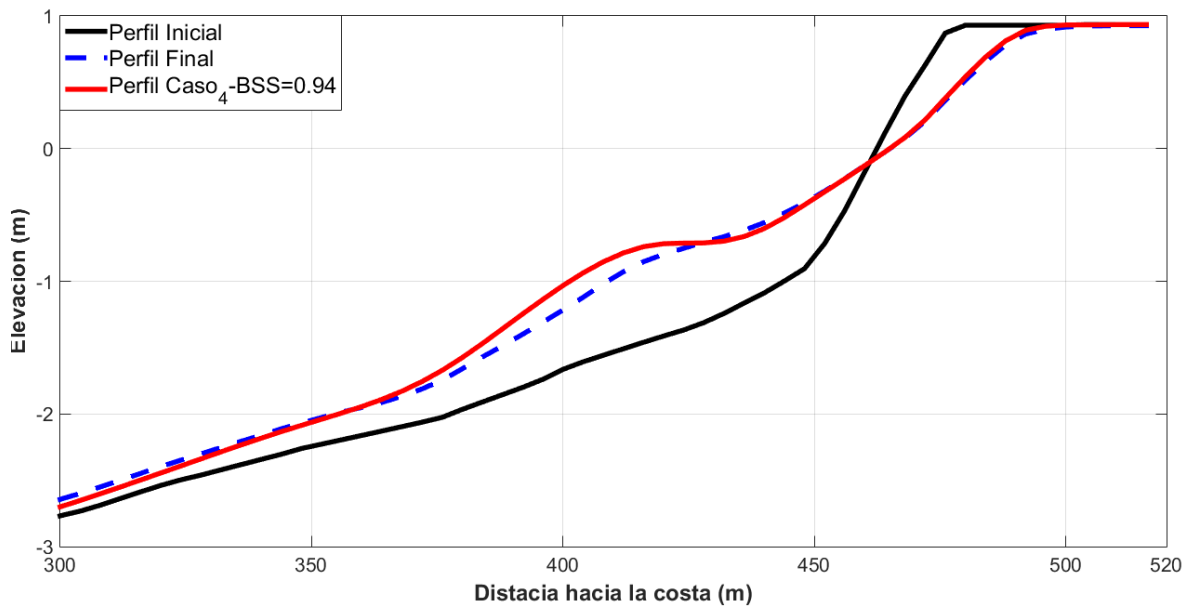
Al igual que en el modo estacionario los casos 1,2 y 4 alcanzaron los mayores puntajes de BSS y RMSE de hasta 0.96 y 0.05 respectivamente, sin embargo, los puntajes de predicción fueron mejores para el modo surfbeat que para estacionario. Es posible que lo anterior sea originado porque al parametro *facua* se le asignó un valor de 0.1 en vez de cero como sucedió en modo estacionario y de acuerdo con Trouw et al. (2012) el valor sugerido para *facua* = 0.1 - 0.15 ya que si éste es igual a uno (1) da como resultado un transporte cerca de la costa con el mismo orden de magnitud que el transporte costa afuera cuando se usa *facua* = 0.1 que es de cero.



a) Perfil de control configuración caso 1



b) Perfil de control configuración caso 2



c) Perfil de control configuración caso 4

Figura 4-4. Puntaje de habilidad del error cuadrático medio del modelo surfbeat

De acuerdo con los resultados de las comparaciones de los perfiles obtenidos en las simulaciones, se observa que cuando aumenta el valor del parámetro *facua*, la deposición de arena en la costa aumenta y viceversa también es cierto. Esta observación depende principalmente del efecto de la asimetría de la onda que a medida que ésta aumenta, la velocidad cerca la línea de costa llega a ser mucho

más alta que la velocidad costa afuera y dado que el transporte de sedimentos está directamente relacionado con las velocidades transversales, éstas provocan el movimiento de sedimentos hacia la costa.

Adicionalmente se observa como al reducir el valor del parámetro facua , la pendiente de la playa es afectada por este cambio. Por tanto, el valor del parámetro wets/p , que está relacionado con la pendiente bajo el agua, también debe ser cambiado. El efecto del cambio en el valor del parámetro facua sobre la pendiente de la playa tienen la siguiente relación, cuando el valor del parámetro facua disminuye, la pendiente de la playa también disminuye. Si el valor del parámetro wets/p en el modelo no se modifica, se observa cierta erosión en las áreas cercanas a línea de costa.

En esta investigación se encuentra que el modelo arroja mejores resultados cuando el efecto de la onda larga no está incluido. Aunque se esperaba que el oleaje swell como las ondas largas sean efectivas en el mar caribe, pero dependiendo de la selección del parámetro de propagación direccional en la definición de las condiciones de frontera costa afuera y las insuficientes mediciones de campo no se pueden observar realmente el efecto de este parámetro. Por lo anterior, y con base a las comparaciones de los BSS y RMSE, es preferiblemente seleccionar para lws un valor de 0.

A partir del análisis de sensibilidad del modelo XBeach en modo estacionario y surfbeat se puede concluir y recomendar valores para varios parámetros que han sido ampliamente estudiados por su sensibilidad (Zimmermann et al., (2015); Bart, (2017); Trouw et al., (2012) y adicionalmente con esta configuración se obtuvieron el puntaje de predicción más alto del modelo XBeach con el menor error cuadrático medio.

La asimetría del oleaje parece ser el principal parámetro de calibración, para el modo surfbeat se recomienda un valor de 0.1, en cambio para modo estacionario los mejores resultados se obtuvieron en las simulaciones que se desactivaron el parámetro.

Otros parámetros, y en particular la pendiente crítica de avalancha bajo el agua, tienen solo un efecto limitado en los resultados. El modelo con $\text{wets/p} = 0.3$ no presenta un comportamiento similar a las mediciones de campo; por lo tanto, el valor del parámetro wets/p se recomienda de 0.1. En cuanto a la turbulencia de la onda larga lws se recomienda un valor de 0.

La Figura 4-4 muestra los perfiles transversales modelados y medidos para los casos de mayor BSS. Adicionalmente se aprecia una erosión importante de la playa posterior a la tormenta, lo que lleva a un retroceso de la cresta de la duna de 8 m. De acuerdo con la Figura 4-4 se considera que el modelo es capaz de representar las variaciones en la playa sumergida ya que los resultados de las simulaciones son muy similares al perfil transversal medido.

- **Sensibilidad lwave**

Cuando la opción lwave está desactivada, el forzamiento del balance de acción de onda corta en el NLSWE está completamente desconectado. Lo anterior indica que no solo se ignoran las ondas de infragravitatorias, sino que también no se tiene en cuenta los forzamientos por los tensores de radiación del balance de acción de onda corta. (Bart, 2017). Por tanto, no puede existir:

- Una disminución del nivel medio del agua (set down).
- Incremento del nivel de agua en la zona de surf (set up).
- Corrientes litorales que normalmente resultarían de tensores de radiación provenientes de ondas oblicuas.

Al comparar los resultados de los modelos con y sin lwave, se obtiene más información sobre la importancia relativa de las ondas de infragravitatorias, set up, set down y las corrientes litorales para la modelación a largo plazo.

Los resultados de la comparación entre modelos con y sin la opción lwave se muestran en la Figura 4-5 y Figura 4-5. Las opciones con lwave (lwave igual a 1 o en su defecto igual a 0) son las mismas que los modelos de referencia para el modo estacionario y surfbeat.

En la Figura 4-5 se presenta la evolución del perfil de playa en modo surfbeat, siendo la línea negra el perfil inicial medido en oleaje moderado (octubre del 2016), la línea suspendida azul representa el perfil final medido en oleaje extremo (noviembre del 2016) y el perfil modelado con XBeach para cada una de las opciones está dado por línea roja.

En cambio, la Figura 4-6 se aprecia la evolución del perfil de playa en modo estacionario, siendo la línea negra el perfil inicial medido en oleaje moderado (julio del 2016), la línea suspendida azul representa el perfil final medido en oleaje moderado (octubre del 2016) y el perfil modelado con XBeach para cada una de las opciones está dado por línea roja.

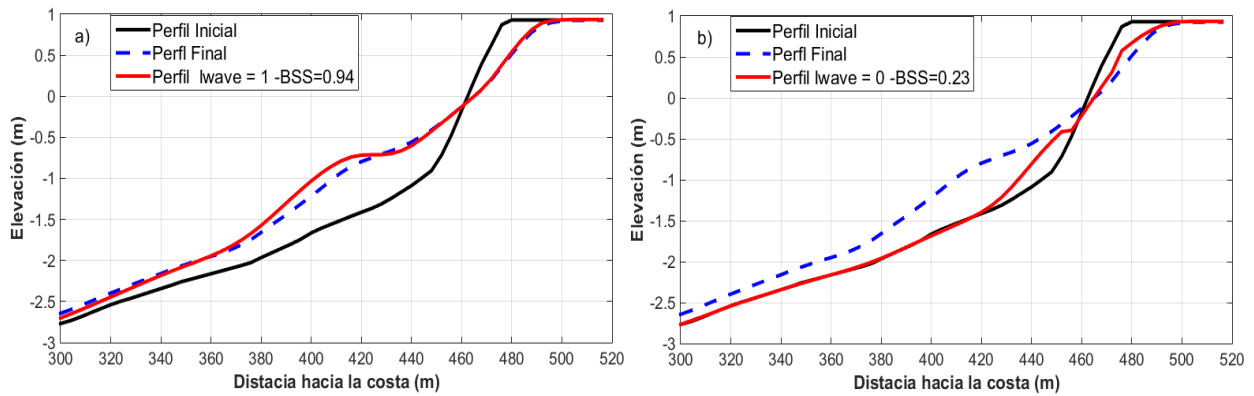


Figura 4-5. Sensibilidad del modelo surfbeat al parámetro $lwave$

a) $lwave = 1$ b) $lwave = 0$

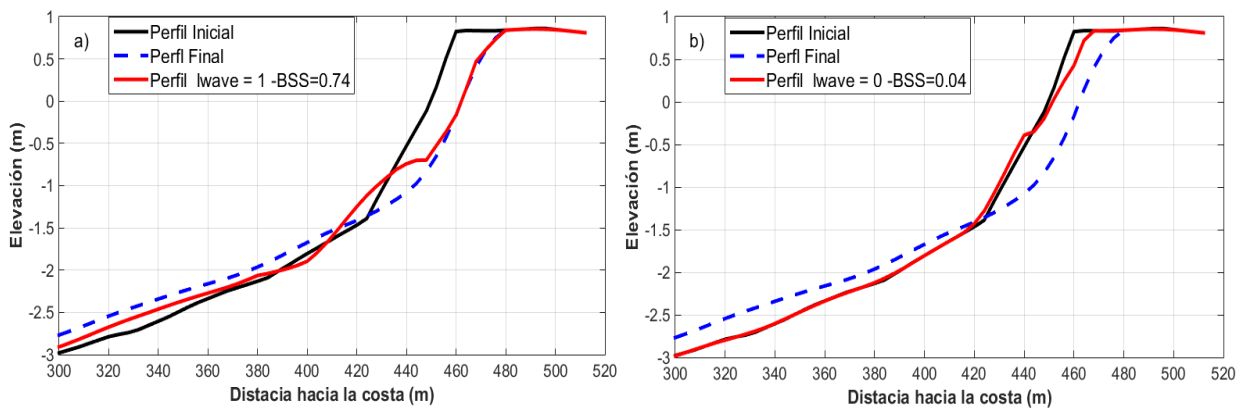


Figura 4-6. Sensibilidad del modelo estacionario al parámetro $lwave$

a) $lwave = 1$ b) $lwave = 0$

Al analizar la Figura 4-5 y Figura 4-6 es visible que la erosión de la duna y la playa es más pronunciada cuando la opción $lwave$ está encendida. El volumen de la erosión de las dunas y la playa es reproducido de forma coherente por surfbeat con $lwave$ (ver Figura 4-5). Las opciones sin $lwave$ no afectan las áreas de dunas más altas (más de 1,5m) lo que causa una subestimación de la erosión en esa área, además que en la parte sumergida no tiene ningún efecto sobre la morfodinámica de la playa puesto que los tensores de radiación responsables de las corrientes litorales están desactivados. En cuanto al modelo estacionario con la opción $lwave$ no produce la mejor estimación de volumen de erosión (demasiado muy cerca de la línea de costa y disminuye a medida que se aleja de la zona surf hasta no realizar ninguna modificación en el fondo). Asimismo, se resumen en la Tabla 4-3 los valores del RMSE y BSS para cada uno de los modelos.

Tabla 4-3. Resumen de sensibilidad del parámetro lwave

Modo XBeach	RMSE	BSS	CLASIFICACIÓN
Estacionario lwave =0	0.31	0.04	Pobre
Estacionario lwave =1	0.15	0.74	Bueno
Surfbeat lwave = 0	0.27	0.23	Pobre
Surfbeat lwave = 1	0.07	0.94	Excelente

Los puntajes de habilidad BSS de los modelos con lwave son mucho mejores. Lo anterior significa que los procesos mencionados que se desactivan con esta opción presentan una gran influencia en la variación morfológica de la playa. Bart, 2017 recomienda no cambiar lwave en modelos a largo plazo. Como se logró observar en las Tabla 4-1 y Tabla 4-2, se pueden obtener puntuaciones de habilidades más altas y RMSE menores calibrando el parámetro *facua* y *wets/p* para el modo estacionario porque el modelo surfbeat presenta un BSS de 0.94 con lwave activado contra 0.23 desactivado.

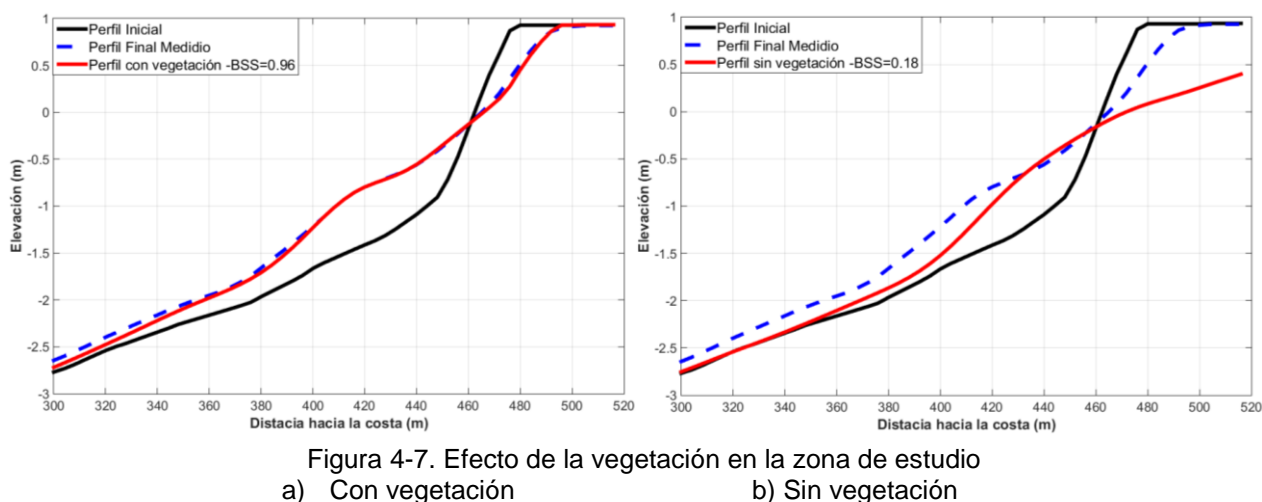
4.1.1 Efecto de la vegetación

En los últimos años se ha intensificado el estudio del efecto de la vegetación en los procesos cerca de la costa, en la presente investigación se tuvo en cuenta la vegetación de la zona de estudio en las diferentes simulaciones, pero antes se determinó el efecto que ésta tiene sobre la evolución del perfil de playa. De acuerdo con los casos anteriores, donde se determinó los parámetros a los cuales el modelo XBeach es sensible, se eligió la mejor configuración para realizar una modelación con el módulo de vegetación apagado. El modelo forzado con las mismas condiciones de oleaje y marea en todos los casos para un periodo de simulación de 5 días.

En la Figura 4-7 se observan los resultados de la modelación con el módulo de vegetación encendido y apagado, la línea negra representa la batimetría inicial medida en condiciones de oleaje moderado, la batimetría medida en condiciones de tormenta está dada por la línea azul suspendida y es comparada con la línea roja que representa el perfil modelado para cada situación.

Como se aprecia en la Figura 4-7 es muy evidente que la vegetación en la zona de estudio es muy importante para evitar la pérdida de sedimentos, con solo desactivar el módulo de vegetación el modelo no presenta una buena correlación con la batimetría final medida, se observa una fuerte sobrestimación de erosión de la duna

de playa en aproximadamente el 60% esto debido a que la vegetación en la ecuación de balance de acción es un disipador de energía (sumidero de la ecuación) por tanto, en los procesos físicos desarrollados por el modelo existe mucha energía y en consecuencia arroja resultados irrealistas. Alcanzando tan solo un BSS de 0.18 clasificada como pobre la simulación, según Van Rijn et al. (2003). Cabe resaltar que es muy importante comparar los resultados obtenidos en la modelación con datos de campo de la disipación de energía realizada por los pastos marino.



Con base en los resultados anteriores y la diferencia que existe en la correlación con la batimetría final medida cuando la vegetación esta apagada y encendida, se recomienda tener en cuenta el efecto de la vegetación, para las siguientes modelaciones el módulo de vegetación estuvo encendido.

4.2 ESCENARIOS CON ESTRUCTURAS ACTUALES MODELADOS

En esta sección se presentan los resultados de las modelaciones en 2DH de la zona de estudio con el fin de identificar el comportamiento de la evolución del perfil ante eventos extremos y oleaje moderado. Inicialmente se realizaron simulaciones de la playa con las estructuras de protección actuales bajo condiciones extremas mediante el modo surfbeat del modelo XBeach. La principal variable tenida en cuenta en el presente estudio es la variación del fondo marino, la cual permite observar el comportamiento de la evolución del perfil ante dichas condiciones climáticas, y a su vez, se analizaron las direcciones de los campos de velocidad debido a su influencia en el transporte de sedimentos.

Como se aprecia en la Figura 4-8a la estructura está ubicada en el medio de la malla computacional, con una longitud de 150 m, aunque solo faltan aproximadamente 5 m para su total colmatación, el periodo simulado corresponde a los días en que el huracán Mathew afectó las playas del municipio de Riohacha (5 días), y fue el intervalo de tiempo utilizado en la calibración. En el análisis de los procesos costeros alrededor de la estructura, el modelo fue forzado con un $H_s = 2$ m y $T_p = 8$ s provenientes del NE (30°).

En la Figura 4-8a se aprecia la batimetría inicial de la zona de estudio, y en la Figura 4-8b se muestra la evolución morfodinámica después de 5 días de simulación, el comportamiento de las isobatas cerca de la dirección Este del espolón indican acumulación de sedimentos, mientras tanto en la región Oeste las isobatas revelan erosión. El patrón de corrientes en el área de estudio mueve el sedimento de Este a Oeste y cuando las corrientes litorales se encuentran un obstáculo, tienden a cambiar la hidrodinámica local, modifican su dirección y físicamente rodean la estructura de protección para dirigirse hacia el mar. Según Ruiz-Martínez et al., (2016) este cambio en la circulación hace que el sedimento se deposite en el lado Este de la estructura.

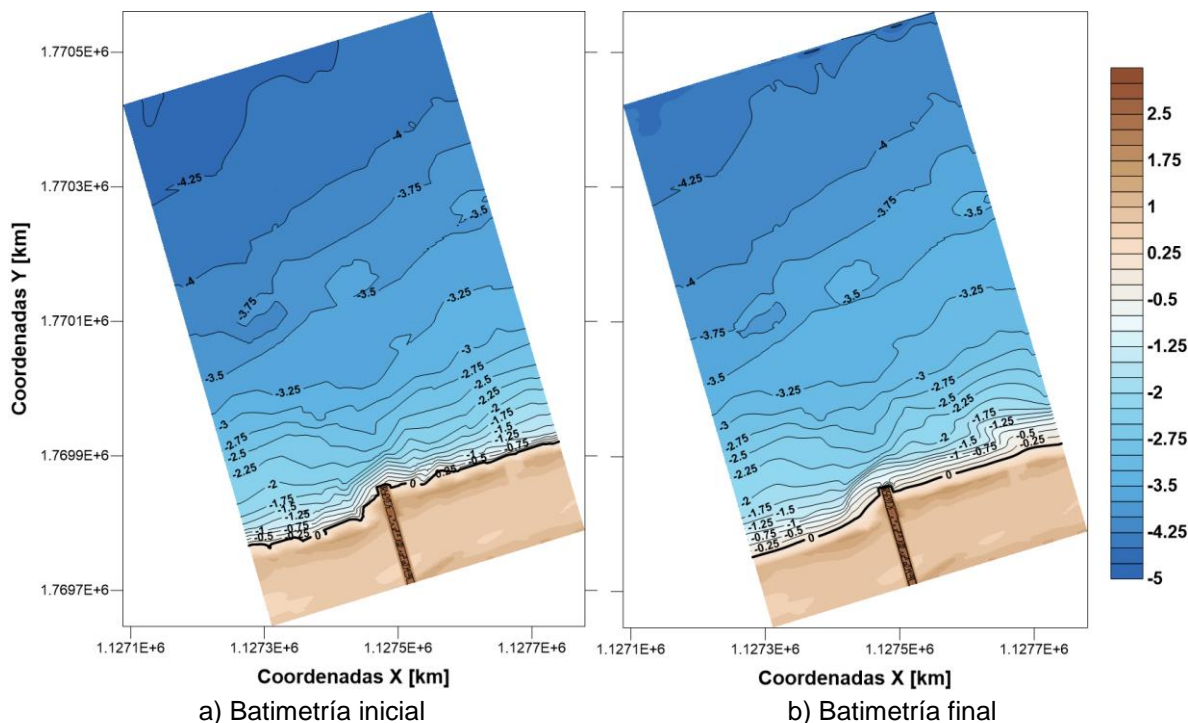


Figura 4-8. Evolución morfodinámica de la zona de estudio en modo surfbeat

En la Figura 4-9 se presentan los vectores de velocidad de corrientes calculados con el modelo XBeach variable que está muy correlacionada con los resultados obtenido anteriormente.

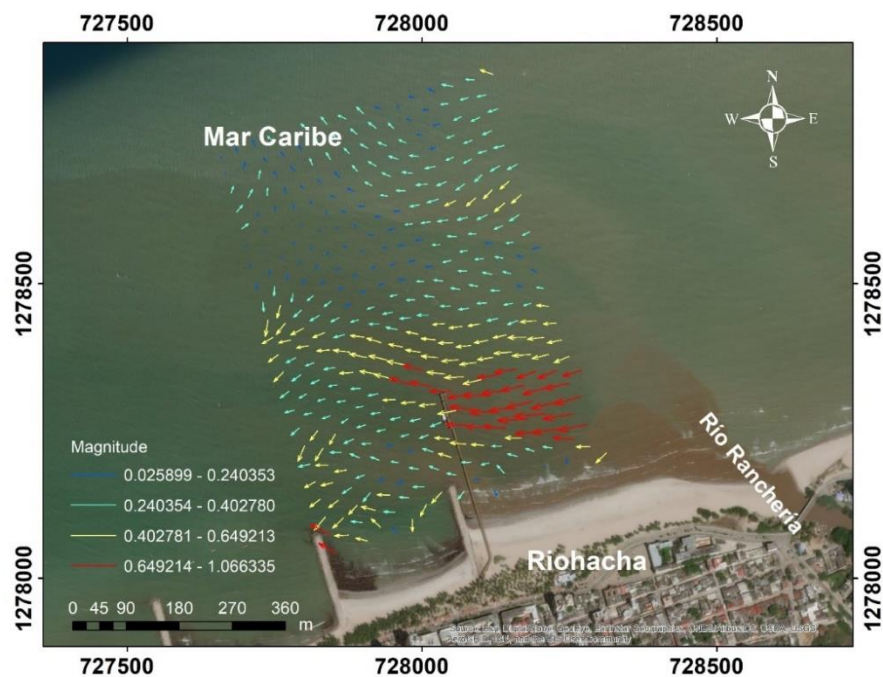


Figura 4-9. Vectores de velocidad modelados con Xbeach

En los resultados presentado en la Figura 4-9 se observa como el modelo XBeach consigue predecir razonablemente la dirección de los vectores de velocidad en la zona de estudio al compararlos con la base de datos HYCOM y Copernicus. Estas velocidades están muy relacionadas con los procesos de erosión y sedimentación que se presentan alrededor de la estructura de protección. Aunque cabe resaltar que la magnitud de las corrientes son sobreestimadas por el XBeach, de acuerdo con los datos obtenidos de Copernicus y reportes de las mediciones realizadas por Invemar & Corpoguajira, (2008) con boyas de deriva muestran esta misma tendencia SW con velocidades en la zona de interés de hasta 0,8 m/s y en cambio las magnitudes de las velocidades modeladas alcanzan valores de 1.06 m/s.

En búsqueda de dar cumplimiento a uno de los objetivos planteados en la investigación de conocer el comportamiento de la evolución del perfil durante las condiciones climáticas que predominan durante todo el año, en la Figura 4-10 se puede observar el mapa de evolución morfológica de la zona de estudio en modo estacionario, es decir oleaje moderado. Para esta simulación se tomó un periodo de modelación de 90 días que corresponden al intervalo de tiempo utilizado en la calibración del modo estacionario; en este caso se usó un $H_s = 1$ m y un $T_p = 3$ s con dirección NE (45°), además de un factor de aceleración morfológica de 10.

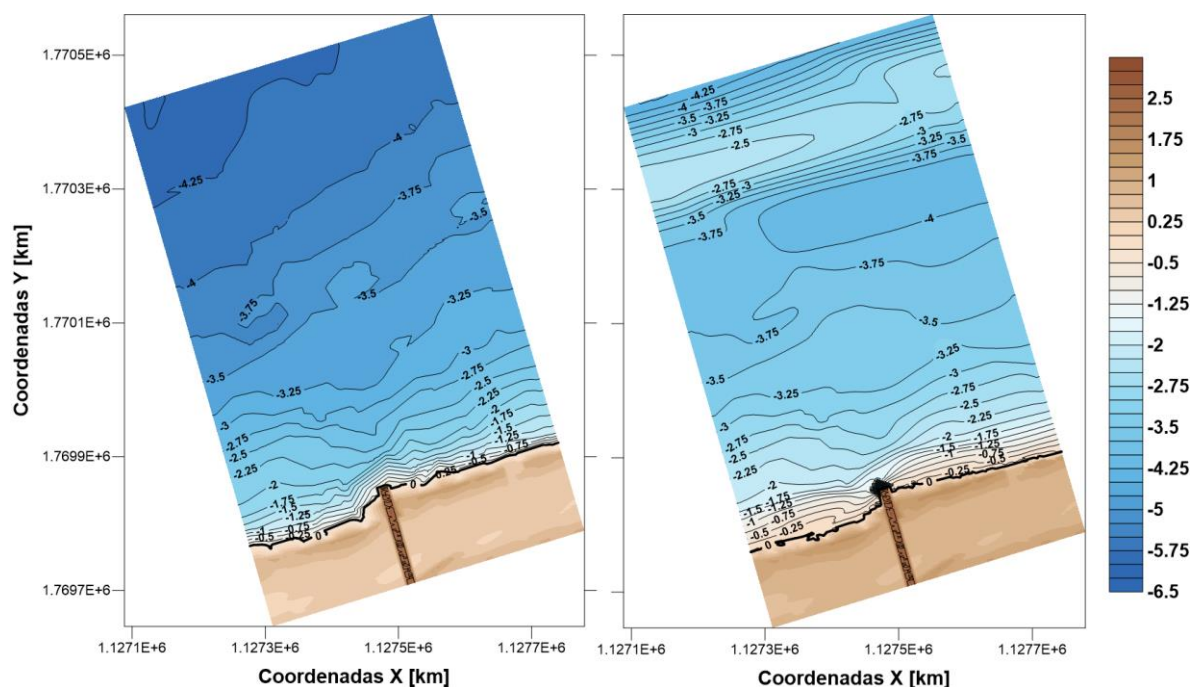


Figura 4-10. Evolución morfodinámica de la zona de estudio en modo estacionario

La Figura 4-10a muestra la batimetría antes de la simulación, y en la Figura 4-10b se aprecia la batimetría una vez finalizado los 90 días de simulación, al simular las

condiciones medias del oleaje en el caribe colombiano durante 90 días, se observa en la Figura 4-10b, cambios en la batimetría al incrementarse el transporte de sedimentos por el aumento de las corrientes alrededor del espolón, aparte de la aparición de socavaciones en el extremo de la estructura de protección. Estos procesos costeros alrededor de una estructura han sido ampliamente estudiados con el modelo XBeach; por ejemplo Van Geer *et al.* (2014) concluye en su estudio que los cambios sugeridos a las formulaciones del modelo mejoraron significativamente la predicción de un pozo de socavación frente a una estructura de protección costera ya que los resultados alcanzados en las modelaciones se asemejan a los datos medidos durante el desarrollo del pozo de socavación frente a un revestimiento durante tres experimentos

Por otra parte, se aprecia en la Figura 4-10b una sobrestimación de acreción en la zona de mayor profundidad de la malla de cálculo, donde las isobatas pasan de ser -4 a -2.5, resultados similares encontraron Pender & Karunarathna, (2013) en su estudio, donde reportaron que los volúmenes de acreción fueron sobreestimados. Aunque Zimmermann *et al.*, (2015) recomienda ajustar los parámetros de asimetría y oblicuidad del oleaje para mejorar el rendimiento del modelo en modo estacionario, dichos parámetros fueron ajustados, sin encontrar un buen mejor resultado.

Cabe resaltar que una de las limitaciones del modelo XBeach en modo estacionario es que no tiene la capacidad de mover sedimentos lejos de la costa. Según Bart, (2017) un módulo eólico puede ser el requisito faltante para una modelación mejor a largo plazo.

4.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN HIPOTÉTICOS MODELADOS

En esta sección se puede encontrar los resultados de las simulaciones realizadas para las diferentes configuraciones de medidas de protección costeras establecidas en el capítulo anterior con el fin de conocer la influencia sobre la evolución del perfil.

Como se especificó en la metodología las configuraciones señaladas se dividieron en infraestructura verde e ingeniería dura para identificar la de mayor influencia en la evolución del perfil y a su vez en los procesos erosivos.

4.3.1 Ingeniería Blanda

En esta alternativa de solución se planteó el relleno artificial de la playa sumergida que se asemejará a una barra sumergida natural (ver sección 3.8). Se realizaron simulaciones para diferentes profundidades de la barra sumergida, pero con las mismas dimensiones geométricas (altura y ancho). La configuración y la profundidad de ubicación de la barra de arena se realizó con base a la batimetría de la zona y revisión de la literatura; por ejemplo Arifin & Kennedy, (2011) observaron que las barras rítmicas se desarrollan cerca de la línea de costa de 1.5 a 3 m de profundidad, Ruessink et al., (2009) observó en las costas Australianas que las barras se encontraban a 100 y 150 m de la línea de costa.

En la Figura 4-11a se observa la batimetría antes del inicio de la simulación y una vez terminada la modelación en la Figura 4-11b, la cual fue realizada con un intervalo de duración de 5 días, bajo las condiciones de oleaje de $H_s=2$ m y $T_p=8$ s, con dirección predominante de 30° . Esta configuración de la barra fue ubicada a 2.5 m de profundidad y aproximadamente 120 m de la línea de costa.

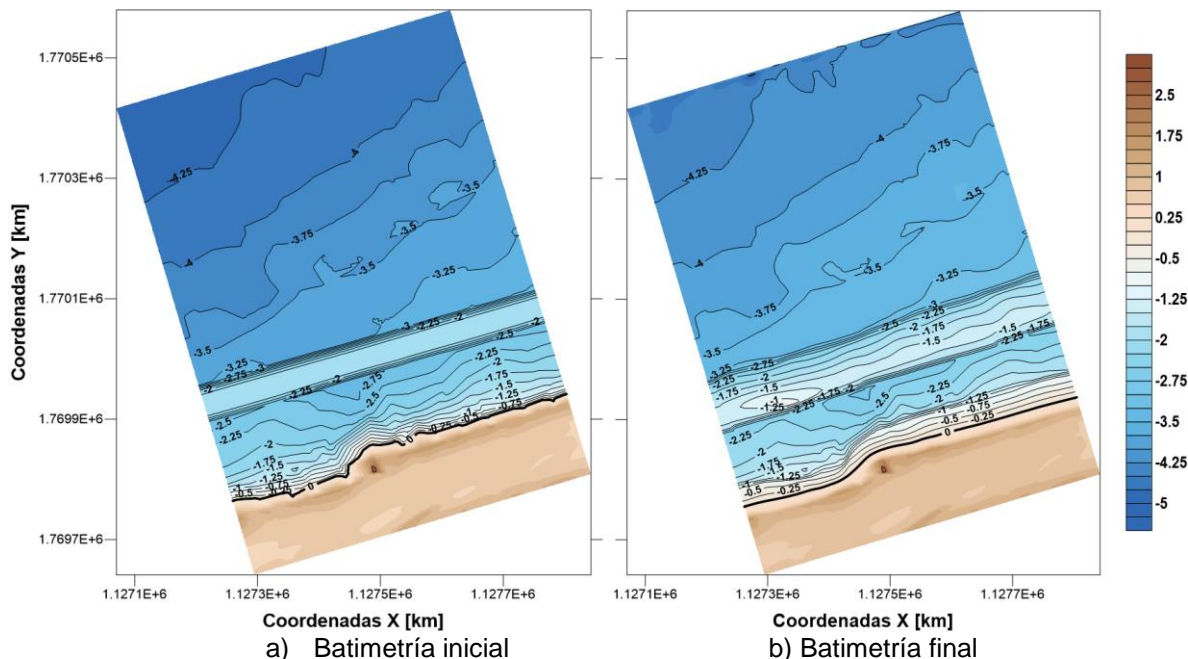


Figura 4-11. Evolución morfodinámica de la barra artificial a un $h=2.5\text{m}$

Para incluir el relleno artificial en los procesos de simulación del XBeach fue necesario cambiar las isobatas de la batimetría original, pasando de ser -2.5 a -1.5 en un ancho de costa de 30 m , a diferencia de las estructuras duras el modelo si puede erosionar el relleno incluido en la zona, por tanto, no se activó ningún otro parámetro en las modelaciones.

Realizando una comparación entre la Figura 4-11a y Figura 4-11b se aprecia cómo se transporta el sedimento transversalmente en la playa debido al cambio en las isobatas pasando de -1.5 a -1.25 , es decir se presenta una reducción de la profundidad, sin embargo el sedimento que tiende costa afuera se acumula en la barra sumergida artificial (ver Figura 4-14), permitiendo de esta forma que no se pierda el equilibrio del sistema con el transporte de los sedimentos mar adentro. Adicionalmente, se evidencia la afectación en la parte frontal del relleno artificial (ver Figura 4-14) debido a la rotura anticipada del oleaje, por tanto, la energía de las olas incidente es reducida disminuyendo así los procesos erosivos en la línea de costa.

En la Figura 4-12a se observa la batimetría inicial de la zona en estudio con una barra artificial ubicada a 3 m de profundidad y aproximadamente 180 m de la línea de costa, en este caso el cambio se evidenció en cambios de las isobatas de -3 y -3.5 a tener una franja de 30 m con isobatas de -2.4 . Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4-12b

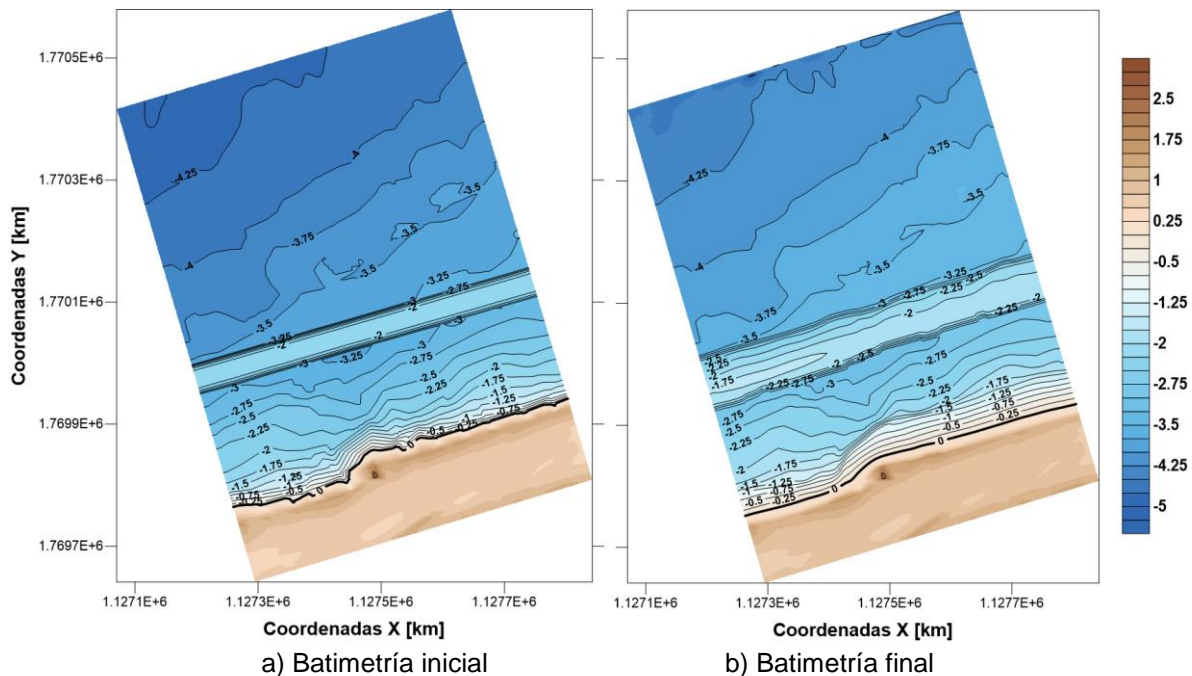


Figura 4-12. Evolución morfodinámica de la barra artificial a una $h=3\text{m}$

En el mapa de evolución morfodinámica (Figura 4-12) se evidencia mayor acumulación de sedimentos en la playa sumergida en comparación al caso con la barra localizada a un $h=2.5\text{m}$ puesto que las isobatas pasan de ser -1.75 a -1.5 (ver Figura 4-12b y ver Figura 4-14b), en este caso hay mayor movimiento en las isobatas. Lo anterior indica que la barra artificial ubicada a mayores profundidades y a mayor distancia de la línea de costa es menos efectiva en cuanto a la reducción del oleaje energético y por tal razón como se aprecia en la Figura 4-14b la parte frontal de la barra se ve menos afectada. Por otra parte, como se describió en la sección 3.1 la zona de estudio es una playa micro-mareal que reporta según el IDEAM, (2016) una carrera de marea de hasta máximo 0.5m en el periodo de modelación, por tanto, las corrientes son generadas principalmente por el oleaje y éstas a su vez son las conducen el transporte de sedimentos y eventualmente la actualización del nivel del fondo.

En la Figura 4-13b se presentan los resultados obtenidos para una barra sumergida ubicada a 3.5m de profundidad y aproximadamente 210m de la línea de costa. Los resultados de la simulación revelan que la barra artificial es insignificante en cuanto a los procesos de reducción de oleajes energéticos debido primero a que la configuración frontal de la barra es muy similar a su disposición original (ver Figura 4-14c), no sufrió mayor afectación y segundo que los contornos batimétricos pasan de ser -2 a -1.75 en la línea de costa, es decir se presenta un traslado transversal del sedimento que estaba unido con duna pasa a la parte sumergida, este proceso acontece porque la playa está expuesta a intensos oleajes sin barrera de arena que

reduzcan su energía, como si se ocurre en los casos anteriores que la barra se encuentra a menor profundidad y las olas sienten el fondo, produciéndose de forma anticipada el proceso de someramiento y en consecuencia la rotura del oleaje retirada de la línea de costa.

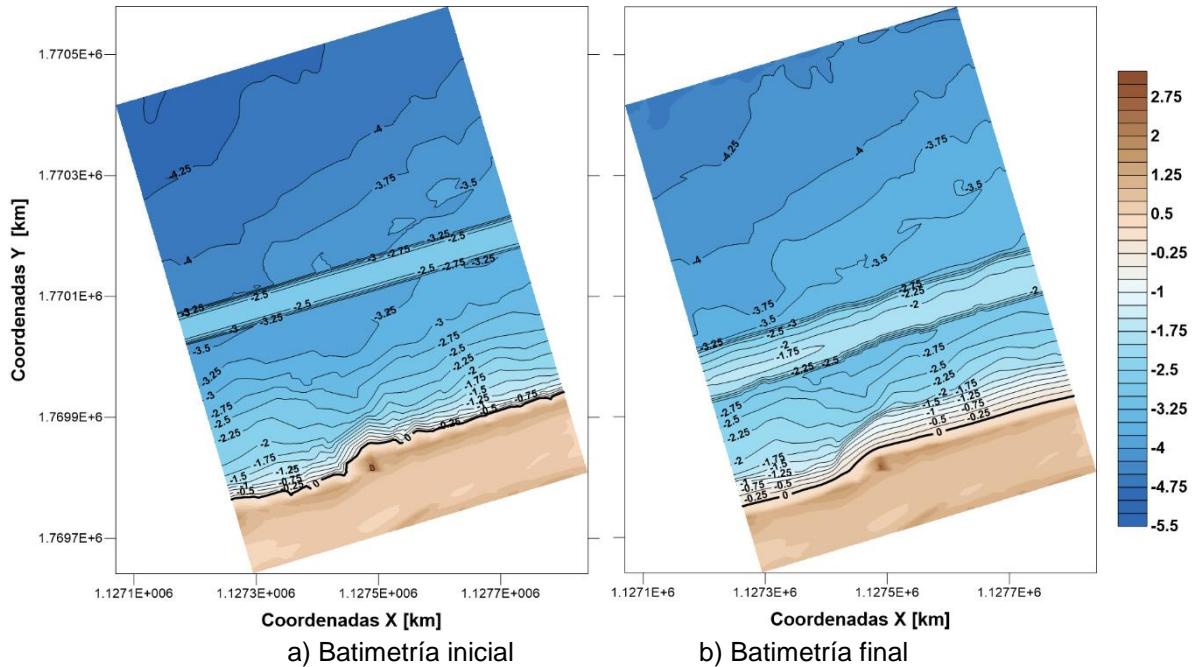


Figura 4-13. Evolución morfodinámica de la barra artificial a una $h=3.5\text{m}$

Con el fin de mostrar los efectos para cada una de las profundidades en que se ubica la barra sumergida artificial se presentan en la Figura 4-14 los perfiles de cada uno de los casos simulados. Al ubicar una barra con estas dimensiones en la playa de estudio, la pendiente de ésta cambia y por consiguiente el estado de la playa es reflectiva, razón por la cual no hay diferencias significativas en la erosión del frente de playa ya que la rotura del oleaje luego que pasa la barra es en la línea de costa.

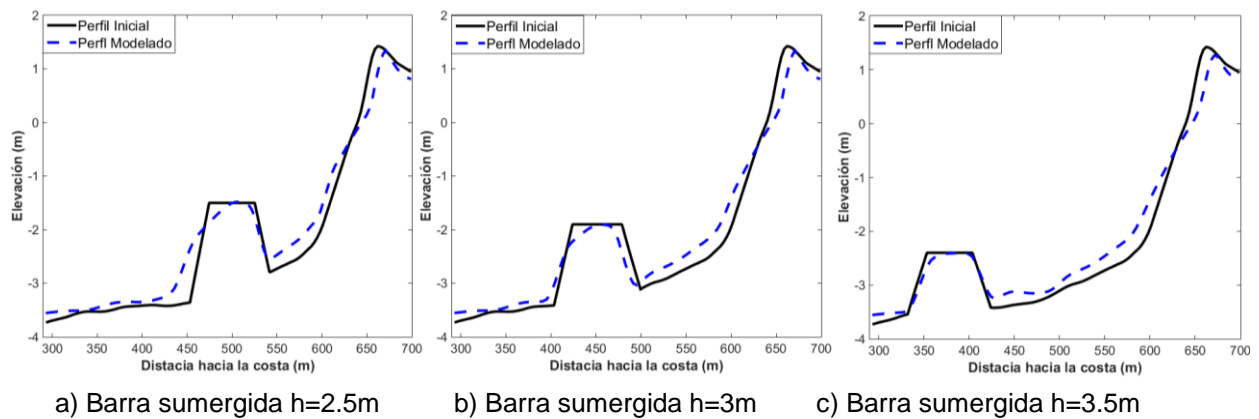


Figura 4-14. Comparación de perfiles de playa con soluciones de ingeniería blanda

Continuando con el análisis del escenario hipotético de la playa en estudio con la presencia de una barra artificial sumergida, se presenta en la Figura 4-15 una comparación de los procesos erosión y acreción de los escenarios analizados con barras artificiales localizadas a diferentes profundidades. Siendo los procesos de erosión representados por el color azul y los procesos acumulativos denotados por el color rojo.

Realizando la comparación de los escenarios se demuestra como la barra sumergida (Figura 4-15a) ubicada a 2.5 m de profundidad reduce la erosión de la línea de costa debido a que disminuye la energía del oleaje puesto que se adelanta el proceso de someramiento y en consecuencia la rotura de las olas, razón por la cual, la barra tiende a moverse costa afuera por la incidencia del oleaje (erosiona y deposita en zonas más profundas).

En cambio, la barra sumergida ubicada a 3 m de profundidad (Figura 4-15b) reduce en menor cantidad la energía del oleaje y por tanto, la línea de costa está más expuesta a los procesos de erosión como se aprecia en la Figura 4-15b, donde la franja de color azul que indica la erosión, es más grande en comparación con la Figura 4-15a, asimismo la deposición de sedimentos (color rojo) en dirección costa afuera es significativamente mayor. Adicionalmente se observa como la barra de arena no se ve tan afectada por la incidencia del oleaje, ya que la franja azul es de menor intensidad y tamaño al compararla con la Figura 4-15a, es decir que el transporte hacia costa afuera es relativamente pequeño y, en consecuencia, la deposición representada con color rojo es del rango de 0.4 -0.6 m.

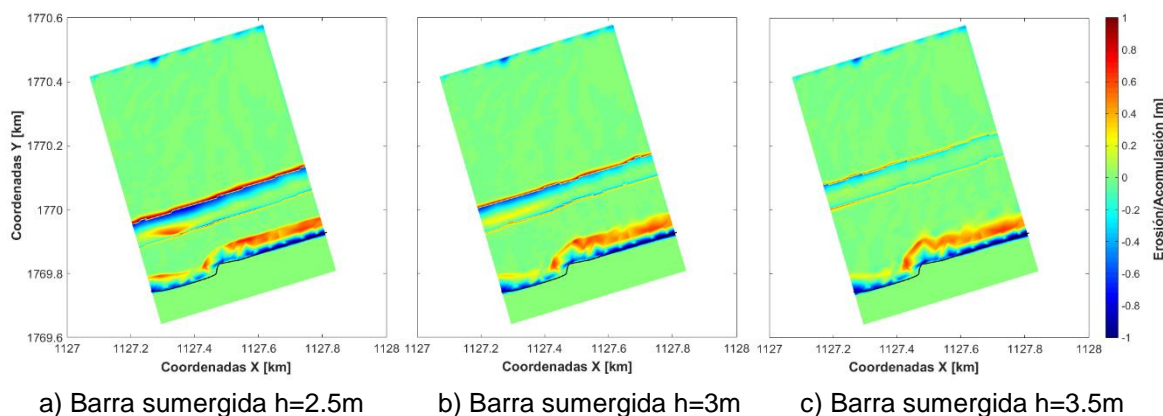


Figura 4-15. Comparación de procesos de erosión y acreción de ingeniería blanda

En cuanto a la Figura 4-15c el oleaje no siente la presencia de la barra sumergida localizada a 3.5 m de profundidad y 210 m de la línea de costa se aprecia como aumenta considerablemente los procesos de erosión (color azul) en el frente de playa y en consecuencia la acreción (color rojo) en dirección costa afuera con un

rango de 0.6-0.8 m ocupa mayor área en comparación con los escenarios anteriores. Asimismo, se observa la migración neta costa afuera NOM que son influenciadas por la energía del oleaje, la orientación de la playa y el tamaño de los sedimentos (Aleman et al. 2013).

La configuración geométrica de la barra artificial en la Figura 4-15c no se ve afectada por la incidencia del oleaje como si ocurre cuando se localiza a menores profundidades y más cerca de la línea de costa. Por otra parte, un hecho a resaltar que se evidencia en los tres escenarios es como las barras a diferentes magnitudes de acuerdo con su ubicación protegen la línea de costa entre las coordenadas 1127.2 y 1127.5 en el eje x en comparación con el resto de la línea costera y en todos los casos las barras presentan mayor afectación en esa dirección transversal.

4.3.2 Ingeniería Dura

En general las estructuras de protección costera modifican la hidrodinámica de la zona y en consecuencia los patrones de circulación y transporte de sedimentos. Por lo anterior, en las soluciones duras se plantearon diferentes configuraciones de estructuras de protección costera (ver sección 3.8). Uno de los objetivos de la implementación de estos tipos de escenarios es analizar el comportamiento de las barras sumergidas ante la presencia de dichas estructuras. Los resultados de los cambios en el fondo del mar después de 5 días de simulación se muestran con espolones de 50 m de longitud en la Figura 4-16, la separación entre estructuras es de 100 m.

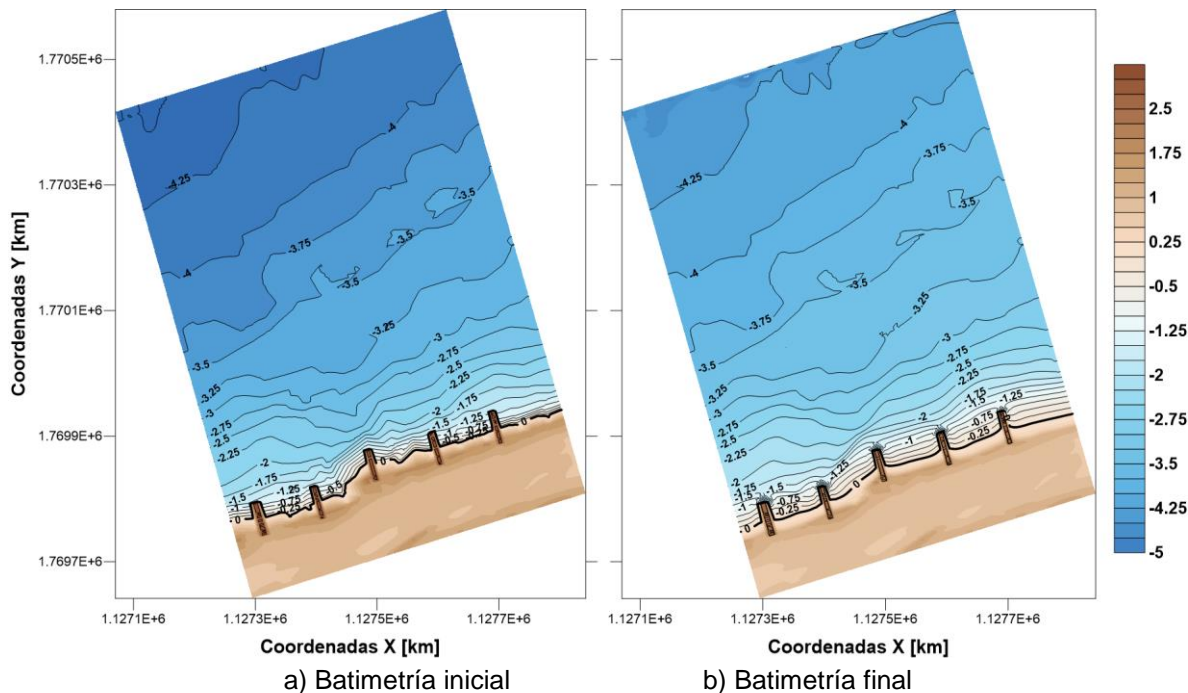


Figura 4-16. Evolución morfológica bajo condiciones de $H_s=2$ y $T_p=8s$, con espolones lineales.

Los resultados muestran que los contornos batimétricos en las regiones adyacentes a las estructuras tienen un efecto simétrico. De hecho, las desventajas de este tipo de solución a problemas de erosión han sido ampliamente documentados (Ranasinghe & Turner, (2006); USACE, (1992); Ruiz-Martínez et al., (2016)) y son originadas por el hecho de que estas soluciones inducen la circulación local y tienden a aumentar la erosión en la playa aguas abajo de la estructura, y acreción en el lado aguas arriba, asimismo, la exportación de arena costa afuera una vez que la zona se llena de arena, desestabilizando seriamente el equilibrio de sedimentos a lo largo de la playa. Por otro lado, cuando se usan estructuras cortas para condiciones extremas la tendencia es hacia la erosión de la playa y el XBeach sigue dicha tendencia. También cabe agregar que el modelo tiende a crear un pozo de socavación en el extremo de la estructura de protección costera.

Posteriormente en la Figura 4-17a se presentan los rompeolas, situados a 70 m de distancia de la línea de costa con una longitud de 70 m y según los resultados obtenidos del modelo, esta configuración de protección permite retener material en la zona protegida por la estructura (Figura 4-17b). La zona expuesta de los rompeolas presenta una gran socavación alcanzando profundidades de 5 m.

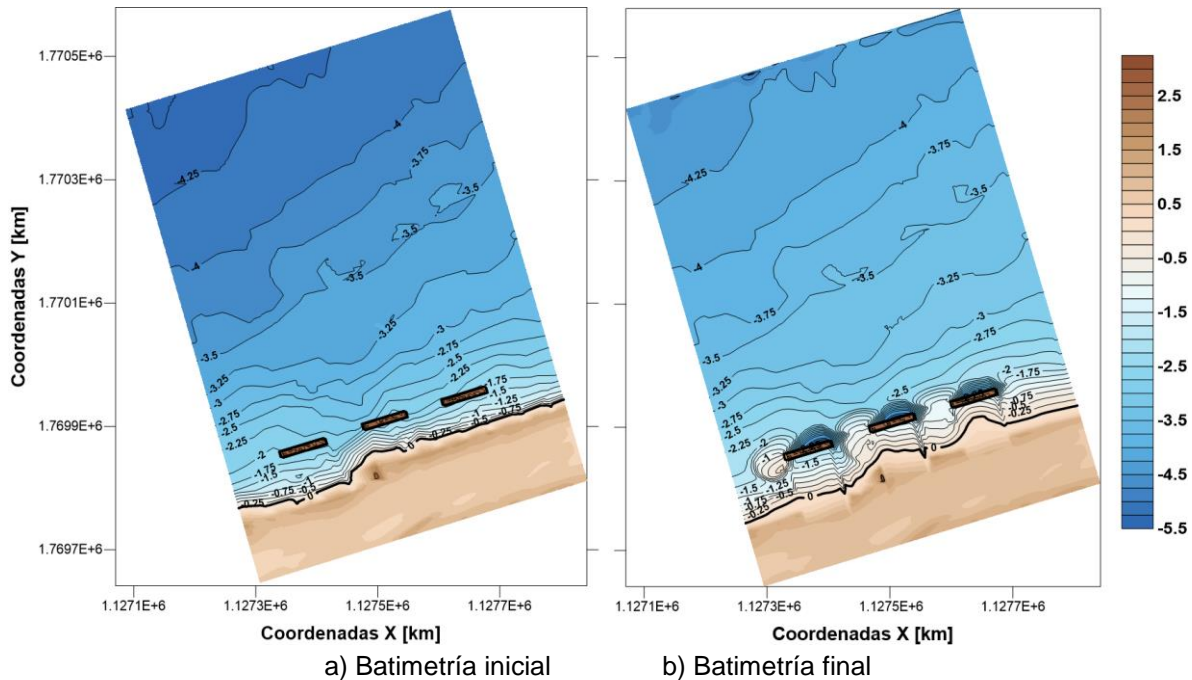


Figura 4-17. Evolución morfológica bajo condiciones de $H_s=2$ y $T_p=8s$ con rompeolas.

La Figura 4-17b muestra como el rompeolas localizado en la coordenada x 11277 desarrolla una notable mayor acumulación de sedimentos en la zona al abrigo del rompeolas, con tendencias a la formación de tómbolo, disminuyendo en los rompeolas siguientes hasta llegar a la última estructura en la que no se evidencia la formación del tómbolo. Lo anterior probablemente se debe a que la estructura está más alejada de la línea de costa y la ubicación del rompeolas lejos de proteger la costa, ocasiona un proceso erosivo mucho mayor del que se produce de manera natural. Los patrones muestran que el movimiento de sedimentos se produce desde la zona protegida, donde se evidencia una fuerte erosión, hacia la parte delantera.

Por otra parte, en el extremo inferior del último rompeolas se evidencia un proceso de difracción del oleaje que permite la sección de energía y la acumulación de sedimentos en la zona siguiente de la estructura.

Continuando con Bodge (2003) quien simuló numéricamente el patrón morfológico producido en un segmento de playa por un sistema de espolones en forma de T, donde las olas se propagan hacia la playa, la cabeza de los espolones genera difracción de onda causando así variaciones en la línea de costa debido a que sufre un cambio importante en la interrupción de la propagación del oleaje. Estos fenómenos causan un estado de equilibrio en las bahías de cada lado de la parte central de la estructura (Figura 4-18). Dicho efecto permite retener mayor cantidad de sedimentos en la parte izquierda de cada estructura y genera un seno de erosión en la parte derecha de cada estructura. Adicionalmente, se aprecia la socavación

que se presenta en la cabeza de la estructura debido a que los vectores de velocidad de las corrientes bordean la estructura y transportan los sedimentos costa afuera.

El efecto generado por la configuración de las estructuras de protección costera en forma de T permite tener condiciones de acreción para desarrollar un tómbolo alrededor de las estructuras. Asimismo, hay que resaltar que la cabeza de estos espolones retiene el sedimento removido de la línea de costa durante la simulación de 5 días a diferencia de los espolones lineales que la mayor parte del sedimento se va a costa afuera.

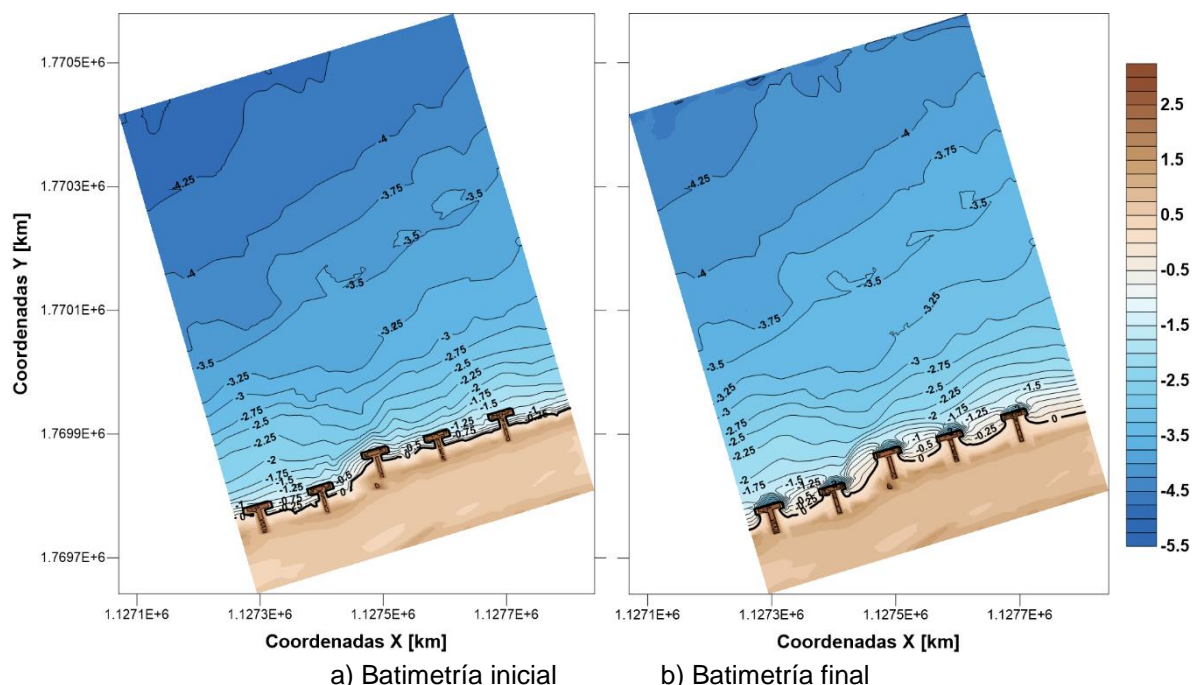


Figura 4-18. Evolución morfológica bajo condiciones de $H_s=2$ y $T_p=8s$ con espolones en T.

Debido a que el modelo XBeach ha sido aplicado para el estudio de procesos de sedimentación en puertos costeros de aguas poco profundas Bolle et al. (2011). Por tanto, se decidió realizar un análisis del comportamiento de las barras sumergidas en presencia de obras de abrigo lineales (Figura 4-19a) e inclinadas (Figura 4-20a).

En cuanto a las Figura 4-19b y Figura 4-20b se observa cómo se extiende aún más la erosión en la Figura 4-20b en comparación con la Figura 4-19b. Aunque las isobatas son similares en la parte frontal de la estructura de protección, en ambos casos se evidencia un gran pozo de socavación hasta alcanzar profundidades de 6 m, además de erosión en la obra de abrigo izquierda.

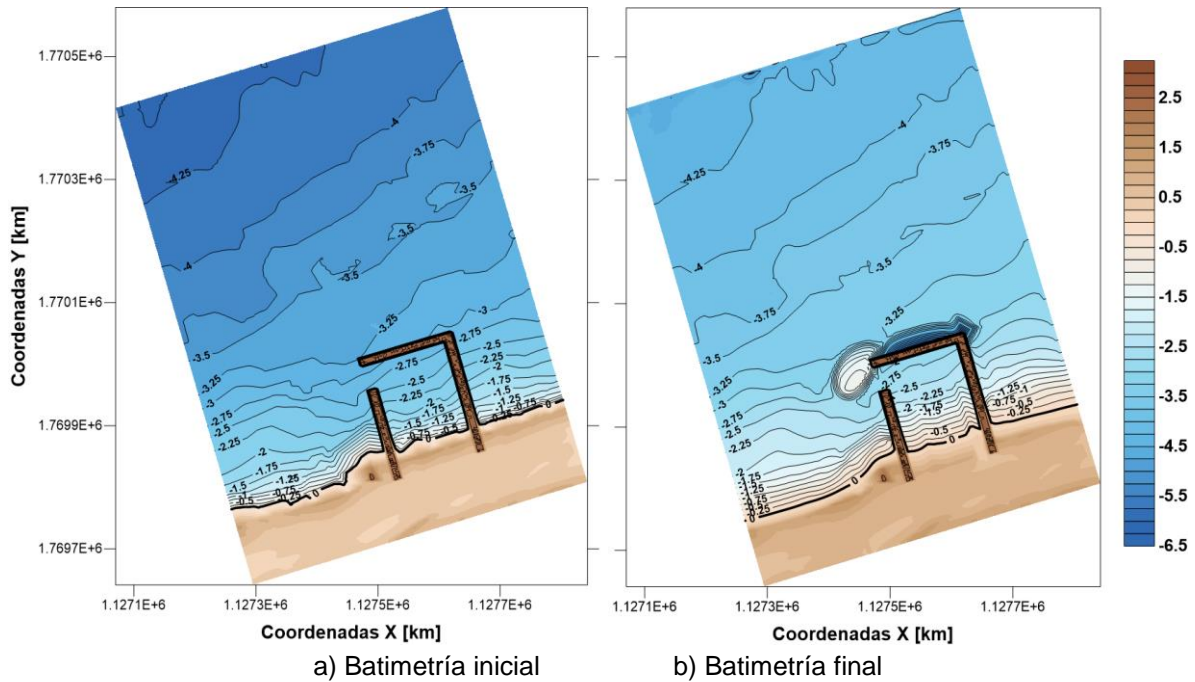


Figura 4-19. Evolución morfológica bajo condiciones de $H_s=2$ y $T_p=8s$ con obras de abrigo.

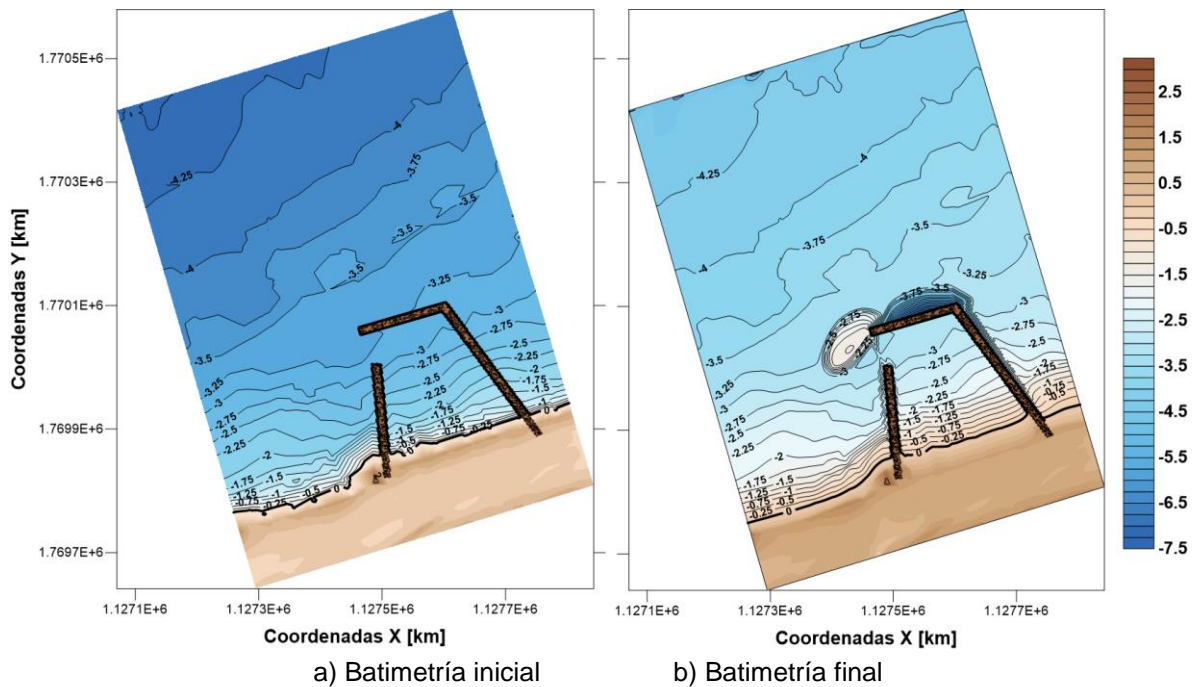
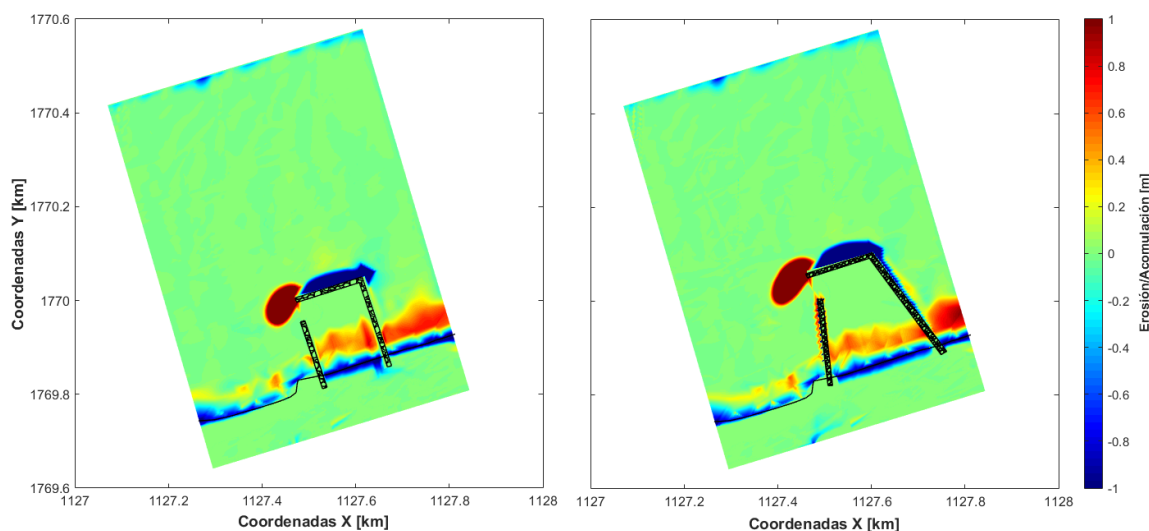


Figura 4-20. Evolución morfológica bajo condiciones de $H_s=2$ y $T_p=8$ con obras de abrigo inclinada.

En la Figura 4-21 se evidencia como se presenta acumulación de sedimentos en la entrada de las obras de abrigo debido al transporte de sedimentos forzados por las corrientes litorales que van en dirección SW.

Al realizar la comparación de la Figura 4-21a y la Figura 4-21b encontramos que no hay diferencia significativa en los procesos de erosión y acumulación entre la obra de abrigo lineal con la inclinada debido a los procesos físicos que se presentan en la zona, como la refracción del oleaje, ya que éste se propaga desde costa afuera y se encuentra con un rompeolas exterior artificial cambiando de esta forma su dirección de propagación. La estructura genera la no concentración de energía y a diferencia de la refracción, se presenta la transferencia o cesión lateral de energía en la cresta de una onda en una dirección perpendicular a la dirección predominante de propagación, es por tal motivo que en los mapas de evolución morfológica (Figura 4-19 y Figura 4-20) y en las figuras de erosión y sedimentación de los dos escenarios (Figura 4-21a y Figura 4-21b) se aprecia que en la zona adyacente a la obra se acumula sedimentos y en consecuencia las isobatas pasan de ser -3.25 a -2.25 y en la parte frontal de la estructura se presenta un fuerte fenómeno de socavación de sedimentos que son transportados por la corriente en el sentido SW. Resultados similares reportó Bolle et al., (2011) que concluyó que el modelo XBeach en 2DH fue capaz de dar una idea de los mecanismos complejos, como la fluencia de sedimentos en el puerto por la presencia de un rompeolas poroso.



a) Obra de abrigo lineal

b) Obra de abrigo inclinada

Figura 4-21. Comparación de procesos de erosión y acreción de soluciones duras

Con base en los resultados obtenidos en las simulaciones con el XBeach para los escenarios con obras de abrigo lineales e inclinadas se puede afirmar que este tipo de estructuras costeras para la zona de estudio acentúan la falta de sedimento pues queda contenida en el interior de las zonas de abrigos debido a los procesos de difracción que sufre el oleaje cuando se propaga y se encuentra con los rompeolas.

5 CONCLUSIONES

En la presente investigación se hizo un análisis del comportamiento que tienen las barras sumergidas ante la presencia de estructuras de protección costera y su influencia en los procesos de erosión que afectan al municipio de Riohacha, La Guajira

El comportamiento de las barras sumergidas se analizó en función del nivel del fondo. Se observó que para las condiciones extremas el comportamiento de las isobatas cerca de la dirección Este del espolón indican acumulación de sedimentos, mientras que en la región Oeste las isobatas revelan erosión. Lo anterior debido a que el patrón de corrientes en el área de estudio mueve el sedimento en dirección Este-Sureste.

Por otra parte, el modelo XBeach consigue predecir razonablemente la dirección de los vectores de velocidad en la zona de estudio, que está muy relacionado con los procesos de erosión y sedimentación que se presentan alrededor de la estructura de protección. Aunque cabe resaltar que la magnitud de las corrientes es sobreestimado.

Al simular con condiciones medias de oleaje son evidentes cambios en la batimetría al incrementarse el transporte de sedimentos por el aumento de las corrientes alrededor del espolón. Se da origen a la aparición de socavaciones en el extremo de la estructura de protección luego de 30 días de simulación. Cabe resaltar que el modelo XBeach en su modo estacionario para simulaciones a mediano plazo sobrestima la acreción en la zona de mayor profundidad de la malla de cálculo, donde las isobatas pasan de ser -4 a -2.5.

De acuerdo con la vía de transporte de sedimentos se puede afirmar que las estructuras de protección costeras actuales en la zona de estudio no son recomendables porque interrumpen el transporte de sedimentos y agravan los procesos de erosión costera aumentando la tasa de erosión y adicionalmente facilitan la exportación de arena hacia costa afuera siendo atrapado por las corrientes y transportados en la dirección predominante SW. Por lo tanto, la opción óptima para mitigar la erosión es el uso de barra artificial sumergida ubicada a 2.5 m de profundidad. Aun teniendo en cuenta que la playa se erosionará con el tiempo, sin embargo, se tiene la expectativa que la arena desplazada se convierta en una fuente de sedimento para las playas adyacentes.

6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Hasta la fecha se cuenta con levantamientos de información de campo con cierto sesgo y series de corta duración, por lo que se debe ampliar la instrumentación de las costas de Colombia para contar con mayor cantidad de datos reales, y que sean útiles para validar los modelos hidrodinámicos y morfológicos del XBeach.

Es muy importante para próximas investigaciones la recolección de información de campo de la disipación de energía por parte de la vegetación en las playas de Riohacha, con el fin de validar la información obtenida por el modelo XBeach.

Es conveniente determinar el comportamiento de la evolución del perfil a mediano plazo con un modelo morfológico de escala temporal mayor, con el objetivo caracterizar completamente su comportamiento.

Así mismo, queda pendiente analizar procesos de pequeña escala, y ver cómo las estructuras modifican el tensor de fuerzas viscosas que son las responsables de las modificaciones morfológicas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Anthony, E. J., & Barusseau, J. P. (2015). Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology*, 241, 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.029>
- Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Barusseau, J.-P., & Gervais, M. (2013). Net offshore bar migration variability at a regional scale: Inter-site comparison (Languedoc- Roussillon, France). *Journal of Coastal Research*, (Fort Lauderdale 2.65), 1715–1720. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Almar, R., Castelle, B., Ruessink, B. G., Sénéchal, N., Bonneton, P., & Marieu, V. (2010). Two- and three-dimensional double-sandbar system behaviour under intense wave forcing and a meso-macro tidal range. *Continental Shelf Research*, 30(7), 781–792. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.001>
- Angnuureng, D. B., Almar, R., Senechal, N., Castelle, B., Addo, K. A., Marieu, V., & Ranasinghe, R. (2017). Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach. *Geomorphology*, 290(February), 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.007>
- Arifin, R. R., & Kennedy, A. B. (2011). The evolution of large scale crescentic bars on the northern Gulf of Mexico coast. *Marine Geology*, 285(1–4), 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.003>
- Armaroli, C., & Ciavola, P. (2011). Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification. *Geomorphology*, 126(1–2), 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.004>
- Arrieta, A., Moreno, D., Covo, A., Barboza, G., Corrales, J., & Wood, W. (2009). Estudios y diseños de alternativas para la estabilización de la boca de El Laguito y un sector de la línea de costa de la isla de Tierrabomba. *Universidad de Cartagena*, 71–83.
- Bart, L. (2017). Long-term modelling with XBeach : combining stationary and surfbeat mode in an integrated approach. *Master Thesis Technical University of Delft*, 1–108.
- Bertoni, D., & Sarti, G. (2011). On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy. *Geomorphology*, 130(3–4), 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.002>
- Birkemeier, B. W. A., & Asce, A. M. (1985). FIELD DATA ON SEAWARD LIMIT OF PROFILE CHANGE. *Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 111(3), 598–602.
- Bodge, K. . R. . (2003). Design Aspects of Groins and Jetties. *Advances in Coastal*

Structure Design, 181–199.

- Bolle, A., Mercelis, P., Roelvink, D., Haerens, P., & Trouw, K. (2011). Application and Validation of Xbeach for Three Different Field Sites. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 40. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.40>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Bruun, P. (1954). *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*. Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Technical Memorandum, 44.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K. D., Robinet, A., Sénéchal, N., & Ferreira, S. (2015). Impact of the winter 2013-2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.006>
- Castillo, M., & Gamarra, E. (2014). shoreline multi-temporal analysis on Tierrabomba island and flood map projection by mean sea level. *Boletín Científico CIOH*, 32, 163–177.
- Cobos, M., Chiapponi, L., Longo, S., Baquerizo, A., & Losada, M. A. (2017). Ripple and sandbar dynamics under mid-reflecting conditions with a porous vertical breakwater. *Coastal Engineering*, 125(December 2016), 95–118. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.006>
- Cooper, J. A. G., & Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43(3–4), 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.07.001>
- COPERNICUS. (2016). *Obtenido de Marine Environment Monitoring Service*: http://marine.copernicus.eu/web/69-interactive-catalogue.php?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_001_002.
- Corbella, S., & Stretch, D. D. (2012). Predicting coastal erosion trends using non-stationary statistics and process-based models. *Coastal Engineering*, 70, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.004>
- CORPOGUAJIRA, & INVEMAR. (2012). Atlas marino costero de La Guajira. *Serie de Publicaciones Especiales de Invemar*, 27, 188.
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. *Bol. Instituto de Investigaciones Marinas Y Costeras*, 33(0122–9761), 5–26.
- Dabees, M., & Kamphuis, W. J. (1998). Oneline, a Numerical Model for Shoreline Change. *26th Coastal Engineering Conference*, 2668–2681.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/9780784404119.202>

- Daly, C. (2009). Low Frequency Waves in the Shoaling and Nearshore Zone A Validation of XBeach. *M.Sc. Thesis Delft University of Technology Faculty*, (June), 132.
- Davidson-Arnott, R. G. D. (2005). Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research*, 216(6), 1166–1172. <https://doi.org/10.2112/03-0051.1>
- Dean, R. (1977). equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Newark,. *Dept. of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware*.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles : Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53–84. <https://doi.org/10.2307/4297805>
- De Schipper, M. A., Reniers, A. J. H. M., Ranasinghe, R., & Stive, M. J. F. (2014). The influence of sea state on formation speed of alongshore variability in surf zone sand bars. *Coastal Engineering*, 91, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.05.001>
- Demirci, M., & Ak??z, M. S. (2012). An investigation on the formation of submerged bar under surges in sandy coastal region. *China Ocean Engineering*, 26(3), 535–546. <https://doi.org/10.1007/s13344-012-0040-2>
- Di Leonardo, D., & Ruggiero, P. (2015). Regional scale sandbar variability: Observations from the U.S. Pacific Northwest. *Continental Shelf Research*, 95, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.012>
- Díaz, J. M., Barrios, L. ., & Gómez-lópez, D. . (2003). *Las praderas de pastos marinos en Colombia. Estructura y distribución de un ecosistema estratégico. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” INVEMAR. Serie Publicaciones Especiales - No. 10.*
- Dubarbier, B., Castelle, B., Marieu, V., & Ruessink, G. (2015). Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior. *Coastal Engineering*, 95, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.09.004>
- Falchetti, S., Conley, D. C., Brocchini, M., & Elgar, S. (2010). Nearshore bar migration and sediment-induced buoyancy effects. *Continental Shelf Research*, 30(2), 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.11.005>
- Fernández-Mora, A., Calvete, D., Falqués, A., & de Swart, H. E. (2015). Onshore sandbar migration in the surf zone: New insights into the wave induced sediment transport mechanisms. *Geophysical Research Letters*, 1(42), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/2014GL063004>
- GIOC. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (1994). Modelo de corrientes de rotura en playas, *Manual de*, 1–77. Retrieved from

<http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>

- GIOC. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). "Documento de referencia, volumen 2: Procesos litorales". Universidad de Cantabria.
- GIOC. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2001). Modelo de evolución del perfil transversal de playa., *Manual de*, 90.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures, volume 33 of Advanced Series on Ocean Engineering. WORLD SCIENTIFIC.*
- Grasso, F., Michallet, H., & Barthélemy, E. (2011). Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events: A morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis. *Coastal Engineering*, 58(2), 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.09.007>
- Grasso, F., Michallet, H., Certain, R., & Barthélemy, E. (2009). Experimental Flume Simulation of Sandbar Dynamics. *Journal of Coastal Research*, 54–58.
- Hanson, H. (1989). Genesis: A Generalized Shoreline Change Numerical Model. *Journal of Coastal Research*, 5(1), 1–27. <https://doi.org/10.2307/4297483>
- HYCOM. (2012). *HYCOM + NCODA Global 1/12° Reanalys. Recuperado 10 de 08 de 2017, de https://hycom.org/data/glb08/expt-19pt1.*
- IDEAM, & Instituto de Hidrológico Meteorología y Estudios Ambientales. (2008). Caracterización climática de variables océano-atmosféricas sobre el Caribe colombiano, 59–111. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/clima+caribe.pdf/be79801d-24f3-4544-bc79-6a20ef186cca>
- IDEAM, & Instituto de Hidrológico Meteorología y Estudios Ambientales. (2016). Boletín condiciones hidrometeorológicas. Retrieved July 9, 2017, from <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/boletin-condiciones-hidrometeorologicas>
- INVEMAR, & CORPOGUAJIRA. (2008). Caracterización de la zona costera del departamento de La Guajira: una aproximación para su manejo integrado, 48. Retrieved from <http://www.pares.com.co/wp-content/uploads/2014/03/>
- INVIAS. (2013). Normas INVIAS, Sección 200 – Agregados pétreos.
- Karunarathna, H., Horrillo-Caraballo, J. M., & Reeve, D. E. (2012). Prediction of cross-shore beach profile evolution using a diffusion type model. *Continental Shelf Research*, 48, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.08.004>
- Kim, D. H., Sanchez-Arcilla, A., & Caceres, I. (2017). Depth-integrated modelling on onshore and offshore sandbar migration: Revision of fall velocity. *Ocean Modelling*, 110, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.12.011>

- Kolokythas, G. K., Silva, R., & Delgado Blanco, M. R. (2016). Morphological evolution of a bed profile induced by a storm event at the Belgian coast predicted by Xbeach model. *The Proceedings of the Twenty-Sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 26 - July 1, 2016*, 1239.
- Lanckriet, T., Trouw, K., Zimmermann, N., De Maerschalk, B., & Suzuki, T. (2015). The effect of wave directional spreading in morphological models: hindcast of the impact of the Saint Nicholas storm on the Belgian coast. *NCK - Days 2015: Book of Abstracts, March 18-20, 2015*, 56(2009), 69.
- Larson, M. (1988). Quantification of beach profile change. *Science And Technology*. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA196585>
- Larson, M., & Nicholas, K. (1989). _ DTIC. *Coastal Engineering Research Center*, 2(90 06 15 010), 1–108.
- Lavalle, C., Gomes, C. R., Baranzelli, C., & e Silva, F. B. (2011). Coastal Zones: Policy Alternative Impacts on European Coastal Zones 2000-2050, (March), 1–107.
- Leont'yev, I. O. (2012). Modeling beach profile evolution at centennial to millennial scales. *Oceanology*, 52(4), 550–560.
<https://doi.org/10.1134/S0001437012040054>
- Lippmann, T. C., & Holman, R. a. (1990). The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *Journal of Geophysical Research*, 95(C7), 11575.
<https://doi.org/10.1029/JC095iC07p11575>
- Losada, I., Medina, R., Losada, M., & Vidal, C. (1995). Modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos. *Ingeniería Del Agua*, 2(Extra), 99–118.
- Márquez, E., & Rosado, J. R. (2011). Clasificación e impacto ambiental de los residuos sólidos generados en las playas de Riohacha, La Guajira, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, (60), 118–128.
- Masselink, G., Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Coastal Engineering*, 9(3), 785–800.
- Morang, A., & Parson, L. . (2008). Coastal terminology and geologic environments. *Coastal Engineering Manual, IV*(Coastal Geology of Engineer Manual 1110-2-1100, chapter IV-1. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.).
- National Hurricane center. (2017). Atlantic Tropical Cyclones and Disturbances. Retrieved from <https://www.nodc.noaa.gov/gocd/index.html>
- Nielsen, P., & Shimamoto, T. (2015). Bar response to tides under regular waves.

- Coastal Engineering*, 106, 1–3.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.001>
- NOAA. (2015). NCDI Standard Online Product: Global Ocean Currents Database (GOCD) (NCEI Accession 0093183). NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. Retrieved from <http://www.nhc.noaa.gov/>
- NOAA. (2015). *National Centers for Environmental Information*. Recuperado el 11 de 05 de 2016, de <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/woa13data.html>.
- NOAA - NCEP. (2016). NCEP North American Regional Reanalysis: NARR. Recuperado el 05 de 01 de 2016.
- Pape, L., & Ruessink, B. G. (2011). Neural-network predictability experiments for nearshore sandbar migration. *Continental Shelf Research*, 31(9), 1033–1042.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.03.009>
- Pender, D., & Karunaratna, H. (2013). A statistical-process based approach for modelling beach profile variability. *Coastal Engineering*, 81, 19–29.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.06.006>
- Phillips, M. S., Harley, M. D., Turner, I. L., Splinter, K. D., & Cox, R. J. (2017). Shoreline recovery on wave-dominated sandy coastlines: the role of sandbar morphodynamics and nearshore wave parameters. *Marine Geology*, 385, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.01.005>
- Price, T. D., & Ruessink, B. G. (2011). State dynamics of a double sandbar system. *Continental Shelf Research*, 31(6), 659–674.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.018>
- Ranasinghe, R., & Turner, I. L. (2006). Shoreline response to submerged structures: A review. *Coastal Engineering*, 53(1), 65–79.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.08.003>
- Rangel-Buitrago, N., & Posada-Posada, B. (2005). Geomorfología y procesos del departamento de Córdoba, Caribe colombiano (sector paso Nuevo -Cristo Rey. *Boletín No 895 Del Instituto de Investigaciones Marinas Y Costeras - INVEMAR*, 34(0122–9761), 101–119.
- Rangel, N. (2009). Contribución Antropogénica a Los Cambios Geomorfológicos Y Evolución Reciente De La Costa Caribe Colombiana. *Revista Gestión Y Ambiente*, 12(2), 43–56.
- Rangel, N., & Melfi, G. A. (2013). Morfología, morfodinámica y evolución reciente en la Península de la Guajira, Caribe Colombiano, 8(1), 7–24.
- Restrepo, A., Agudelo, P., Tejada, C., Morales, R., Torres, R., & Osorio Andrés. (2005). Estudio y evaluación de alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana, 102(23), 90–102.

- Ribas, F., de Swart, H. E., Calvete, D., & Falqués, A. (2011). Modeling waves, currents and sandbars on natural beaches: The effect of surface rollers. *Journal of Marine Systems*, 88(1), 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.02.016>
- Roelvink, D. (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19(1–2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90021-Y](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90021-Y)
- Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., & Dastgheib, A. (2017). Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, (February), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.004>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Roelvink, D., van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., van Rooijen, A., van Geer, P., ... Quataert, E. (2015). XBeach Technical Reference : Kingsday Release, 1–141. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4025.6244>
- Roelvink, J. A., Walstra, D. J. R., & Chen, Z. (1994). Morphological modelling of Keta Lagoon case. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, (1994), 3223–3236.
- Ruessink, B. G., Blenkinsopp, C., Brinkkemper, J. A., Castelle, B., Dubarbier, B., Grasso, F., ... Lanckriet, T. (2015). Sandbar and beach-face evolution on a prototype coarse sandy barrier. *Coastal Engineering*, 113, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.11.005>
- Ruessink, B. G., Kuriyama, Y., Reniers, A. J. H. M., Roelvink, J. A., & Walstra, D. J. R. (2007). Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks, 112, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006JF000730>
- Ruessink, B. G., Miles, J. R., Feddersen, F., Guza, R. T., & Elgar, S. (2001). Modeling the alongshore current on barred beaches. *Journal of Geophysical Research*, 106(C10), 22451. <https://doi.org/10.1029/2000JC000766>
- Ruessink, B. G., Pape, L., & Turner, I. L. (2009). Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system. *Continental Shelf Research*, 29(14), 1663–1677. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.011>
- Ruiz-Martínez, G., Mariño-Tapia, I., Baldwin, E. G. M., Casarín, R. S., & Ortiz, C. E. E. (2016). Identifying Coastal Defence Schemes through Morphodynamic Numerical Simulations along the Northern Coast of Yucatan, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 319, 651–669. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00009.1>

- Ruiz-Martínez, G., Rivillas-Ospina, G. D., Mariño-Tapia, I., & Posada-Vanegas, G. (2016). SANDY: A Matlab tool to estimate the sediment size distribution from a sieve analysis. *Computers and Geosciences*, 92, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.04.010>
- Scott, T., Masselink, G., & Russell, P. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286(1–4), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.004>
- Senechal, N., Coco, G., Castelle, B., & Marieu, V. (2015). Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarrosse, France). *Geomorphology*, 228, 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.025>
- Short, A. D. (1999). *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. (John Wiley, Ed.) (Wiley Chic). New York.
- Stokes, C., Davidson, M., & Russell, P. (2015). Observation and prediction of three-dimensional morphology at a high-energy macrotidal beach. *Geomorphology*, 243, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.024>
- Thiébot, J., Idier, D., Garnier, R., Falqués, A., & Ruessink, B. G. (2012). The influence of wave direction on the morphological response of a double sandbar system. *Continental Shelf Research*, 32, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.014>
- Tiessen, M. C. H., van Leeuwen, S. M., Calvete, D., & Dodd, N. (2010). A field test of a linear stability model for crescentic bars. *Coastal Engineering*, 57(1), 41–51. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.002>
- Trouw, K. J. M., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., & Roelvink, D. (2012). Numerical Modelling of Hydrodynamics and Sediment Transport in the Surf Zone : a Sensitivity Study With Different Types of Numerical Models. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 23. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.23>
- US Army Corps of Engineers. (1992). Coastal Groins and Nearshore Breakwaters. *Engineer Manual*, 90.
- Van de Lageweg, W. I., Bryan, K. R., Coco, G., & Ruessink, B. G. (2013). Observations of shoreline-sandbar coupling on an embayed beach. *Marine Geology*, 344, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.07.018>
- Van Geer, P. F. C., Van Thiel de Vries, J. S. M., Boers, M., Den Bieman, J. P., & McCall, R. T. (2014). Modelling Scour in Front of Dune Revetments in a Surf-Beat Model. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 43. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.sediment.43>
- Van Rijn, L. C. (1998). *Principles of Coastal Morphology*. Aguc Publications, Amsterdam.

- van Rijn, L. C., Waslra, D. J. R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)
- VAN ROOIJEN, A. A., VAN THIEL DE VRIES, J. S. M., MCCALL, R. T., VAN DONGEREN, A. R., ROELVINK, J. ., & RENIERS, A. . (2015). MODELING OF WAVE ATTENUATION BY VEGETATION WITH XBEACH. *E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands*, 1–7.
- Van Thiel de Vries, J., Van Dongeren, A., McCall, R., & Reniers, A. (2008). THE EFFECT OF THE LONGSHORE DIMENSION ON DUNE EROSION, 1–13.
- Vousdoukas, M., Almeida, L., & Ferreira, Ó. (2011). Modelling storm-induced beach morphological change in a meso-tidal, reflective beach using XBeach. *Journal of Coastal Research*, (SPEC. ISSUE 64), 1916–1920. Retrieved from http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84857407278&partnerID=40&md5=283b926e2bb94cbb39b85ea91282b683%5Cnhttp://www.ics2011.pl/artic/SP64_1916-1920_M.I.Vousdoukas.pdf
- Wise, R. A., Smith, J., & Larson, M. (1996). SBEACH: Report 4 - Cross-Shore Transport Under Random Waves and Model Validation with SUPERTANK and Field Data, (April), 140. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA267191>
- Wolman G. & Miller J. (1960). Magnitude and Frequency of Forces in Geomorphic Processes. *The Journal of Geology*, 68, 54–74.
- Wright, L. D., Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zone and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93–118.
- Zimmermann, N. ., Trouw, K. ., De Maerschalck, B. ., Toro, F.; Delgado, R. ., Verwaest, T. ., & Mostaert, F. (2015). Scienti_c support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone; evaluation of XBeach for long term cross-shore modelling. *Technical Report, Flanders Hydraulic Research*, 57.